

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Modestas PIKUTIS

FOTOVOLTINĖS ELEKTRINĖS INTELEKTUALAUS VALDYMO KŪRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2015

Disertacija rengta 2011–2015 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

prof. habil. dr. Jurijs MERKURJEVS (Rygos technikos universitetas, informatikos inžinerija – 07T),

doc. dr. Gytis MYKOLAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Roma RINKEVIČIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Algimantas VALINEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2016 m. sausio 29 d. 13 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2015 m. gruodžio 28 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva) ir Valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekoje (Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2359-M mokslo literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-877-9

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2015

© Modestas Pikutis, 2015

modestas.pikutis@dok.vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Modestas PIKUTIS

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT CONTROL OF A SOLAR POWER PLANT

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2015

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2011–2015.

Supervisor

Prof Dr Habil Romanas MARTAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of electrical and electronic Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Algirdas BAŠKYS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Prof Dr Habil Jurijs MERKURJEVS (Riga Technical University, Informatics Engineering – 07T),

Assoc Prof Dr Gytis MYKOLAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Roma RINKEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Algimantas VALINEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **1 p. m. on 29 January 2016**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 28 December 2015.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania) and State research institute Center for Physical Sciences and Technology (Savanorių ave. 231, LT-02300 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje sprendžiama fotovoltinės jėgainės efektyvaus valdymo mokslinė problema. Tyrimų objektas – fotovoltinių jėgainių valdymo algoritmai ir jų pritaikymas bet kokioms aplinkos sąlygoms bei fotovoltinių jėgainių apkrovos keitimo būdai sekant didžiausios galios tašką. Disertacijos tikslas – sukurti ir ištirti didžiausios galios taško sekimo metodiką leidžiančią padidinti fotovoltinės jėgainės našumą greitai besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis ir patobulinti fotovoltinės jėgainės apkrovos keitimo būdą.

Darbe išspręsti uždaviniai: sukurti modeliai ir ištirtas fotovoltinės jėgainės, veikiančios su didžiausią galią sekančiu valdikliu, našumas, pasiūlyta metodika leidžianti padidinti fotovoltinės jėgainės taikomo didžiausios galios taško sekimo algoritmo efektyvumą, ištirta aplinkos sąlygų kitimo įtaka fotovoltinės jėgainės našumui, pasiūlytas efektyvus fotovoltinės jėgainės apkrovos keitimo būdas.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame apžvelgtos fotovoltinių jėgainių plėtros tendencijos, jų savybės ir veikimas, aplinkos temperatūros įtaka fotovoltinės jėgainės darbo rodikliams. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateiktas sudarytas matematinis fotovoltinės jėgainės modelis įgyvendintas *Matlab*[®]/*Simulink*[®] terpėje. Detalesniems tyrimams fotovoltinės jėgainės struktūra modelyje įgyvendinta išskaidyta į atskirus struktūrinius elementus, kurių visuma sudaro galimybę tirti fotovoltinių jėgainių veikimą esant nenuspėjamai besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis ir naudojant skirtingus vienas kitą papildančius didžiausios galios taško sekimo algoritmus.

Trečiajame skyriuje, pasinaudojus sudarytu matematiniu modeliu, tiriamas fotovoltinės jėgainės veikimas neprognozuojamomis aplinkos sąlygomis, tyrimą suskaidžius į atskirus etapus.

Disertacijos tema paskelbti 6 straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose: 2 straipsniai žurnaluose referuojamuose *Thomson Reuters Web of Knowledge* duomenų bazėje *Web of Science* ir 4 straipsniai žurnaluose referuojamuose kitoje tarptautinėse duomenų bazėse. Disertacijos tema perskaityti 9 pranešimai tarptautinėse bei Lietuvos konferencijose.

Abstract

Evaluation of effective controlling system of solar power plant as a scientific problem is discussed in dissertation. Object of research – methods of load resistance changing and adaptation of algorithms of maximum power point tracking under different environmental conditions of solar power plants. Goal of the thesis is to create and investigate the method of maximum power point tracking which allows to increase the efficiency of solar power plant under fast changing environmental conditions and improve the method of load resistance changing.

Created and investigated models of solar power plant efficiency with maximum power point tracking system. Proposed methodology which allows to increase the efficiency of maximum power point tracking algorithm of solar power plant. The influence of changing environmental conditions on solar power plant was investigated, the effective methodology for changing load resistance of solar power plant was proposed.

Dissertation consists of introduction, three chapters, general conclusions, lists of references and author's publications on the subject of dissertation and summary in English.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the dissertation, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's publications on the subject of the defended dissertation, offering the material of made presentations in conferences.

Reviewed literature is provided and the solar power plant development trends is revised in the first chapter. Reviewed solar power plant operating performance under rapidly changing environmental conditions. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered.

The second chapter describes implementation of a mathematical model in *Matlab*[®]/*Simulink*[®]. The implemented mathematical model allows to simulate various operating conditions of solar power plant: different solar power flux, module temperature or different maximum power point tracking algorithms.

The third chapter, investigates solar power plant operation under unpredictable environmental conditions using the created mathematical model. Investigation is splitted into separated phases.

Six articles are published on the subject of dissertation: two – in scientific journals included in Thomson Reuters Web of Knowledge list Web of Science, four – in scientific journal listed in other international databases. Nine presentations were presented in scientific conferences.

Žymėjimai

Simboliai

- A_M, S_p – fotovoltinio modulio plotas;
 C_{FF} – fotovoltinio modulio užpildymo koeficientas, lygus $1,22 \text{ K} \cdot \text{m}^2$;
 C_m – medžiagos savitoji šiluminė talpa;
 C_{mod} – modulio šiluminė talpa;
 E_0 – saulės galios srautas esant standartinėms bandymo sąlygoms $E_0 = 1000 \text{ W/m}^2$;
 E – galios srautas patenkantis į fotovoltinio modulio paviršių;
 E_Σ – visas saulės galios srautas patenkantis į fotovoltinio modulio paviršių;
 E_{dan} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atspindėjusių nuo dangaus skliauto galios srautas;
 E_{zem} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atspindėjusių nuo žemės paviršiaus galios srautas;
 E_{mod} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atspindėjusių nuo FV modulio paviršiaus galios srautas;
 F_{xy}, F_{yx} – sklaidos koeficientai, apibūdinantys saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų srauto perdavimą iš x paviršiaus į y paviršių ir atvirkščiai;
 h_k – konvekcijos koeficientas $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$;
 $h_{k \text{ lais}}$ – laisvasis konvekcijos koeficientas $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^{3/2}$;

- $h_{k\text{ pad}}$ – padidėjęs konvekcijos koeficientas $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$;
 I_{FVM} – fotovoltinio modulio srovė;
 I_{DGT} – srovė didžiausios galios taške;
 I_{se} – fotovoltinio elemento generuojama srovė;
 $I_{\text{se e}}$ – fotovoltinio elemento generuojama srovė kintant saulės galios srautui;
 $I_{[\text{t}]}$ – fotovoltinio modulio ar jėgainės srovė laiku t ;
 I_{tj} – trumpojo jungimo srovė;
 $I_{\text{tj SBS}}$ – trumpojo jungimo srovė standartinėmis bandymo sąlygomis $E_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ ir $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
 L_x, L_y – nuo paviršių x ir y atspindėjęs saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galios srautas W/m^2 ;
 l_m – medžiagos storis fotovoltiniame modulyje;
 P_{ib} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje;
 P_{is} – generuojama momentinė galia fotovoltinio modulio išėjime;
 P_{konv} – šilumos konvekcijos kitimo greitis fotovoltiniame modulyje;
 P_p – didžiausia fotovoltinio modulio ar jėgainės galia standartinėmis bandymo sąlygomis (pikinė galia);
 P_{tb} – saulės galios sraute esančių trumpųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje;
 R_{ap} – fotovoltinio modulio apkrovos varža;
 R_l – fotovoltinės jėgainės apkrovos varža;
 R_B – charakteringoji modulio varža;
 R_n – fotovoltinio elemento nuosekioji varža;
 S_x, S_y – x ir y paviršių plotai;
 S_p – fotovoltinio modulio paviršiaus plotas;
 S_{PC} – pilnutinės saulės spinduliuotės, krentančios į fotovoltinio elemento paviršių, galios srautas;
 S_{PM} – pilnutinės saulės spinduliuotės, krentančios į fotovoltinio modulio paviršių, galios srautas;
 T_0 – modulio temperatūra esant standartinėms bandymo sąlygoms $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
 T_{apl} – aplinkos temperatūra, $^\circ\text{C}$;
 T_{dan} – dangaus skliauto temperatūra, $^\circ\text{C}$;
 T_{mod} – fotovoltinio modulio temperatūra, $^\circ\text{C}$;
 T_{zem} – žemės paviršiaus temperatūra, $^\circ\text{C}$;
 U_{aj} – tuščios veikos įtampa;
 U_{se} – įtampa fotovoltinio elemento išėjime;
 $U_{\text{se e}}$ – įtampa fotovoltinio elemento išėjime kintant saulės galios srautui;

- U_{FVM} – įtampa fotovoltinio modulio išėjime;
- U_{DGT} – įtampa didžiausios galios taške;
- $U_{[t]}$ – fotovoltinio modulio ar jėgainės įtampa laiku t ;
- ΔI – srovės pokytis per 1 sekundę;
- ΔI_{se} – srovės nuokrypis fotovoltinio elemento išėjime, susidaręs dėl aplinkos temperatūros pokyčio;
- ΔU – įtampos pokytis per 1 sekundę;
- ΔU_{se} – įtampos nuokrypis fotovoltinio elemento išėjime, susidaręs dėl aplinkos temperatūros pokyčio;
- ΔR – apkrovos varžos keitimo žingsnis;
- ΔT_{apl} – aplinkos temperatūros T_{apl} nuokrypis lyginant su standartinių bandymų temperatūra T_0 ;
- α – santykinis fotovoltinio modulio naudingo darbo paviršiaus sugeriančio saulės galios srautą koeficientas;
- α_{tj} – temperatūrinis trumpojo jungimo srovės koeficientas;
- β_{aj} – temperatūrinis tuščios veikos įtampos koeficientas;
- β_{pav} – fotovoltinio modulio pasvirimo kampas;
- η – fotovoltinio elemento naudingumo koeficientas;
- ρ_m – medžiagos tankis;
- σ – Stefano Bolcmano konstanta, $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$;
- χ_p – iš fotovoltinio modulio paimtos energijos neatitikimas, lyginant su atveju, kai apkrovos varža idealiai atitinka didžiausios galios tašką.

Santrumpos

- AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;
- OM – oro masė (angl. *Air Mass*);
- DGT – didžiausios galios taškas;
- DGTS – didžiausios galios taško sekimas;
- DNT – dirbtinių neuronų tinklas (angl. *Artificial Neural Network*);
- FF – srovės ir įtampos kreivės užpildymo koeficientas (angl. *fill factor*);
- FVC – fotovoltinis elementas;
- FVJ – fotovoltinė jėgainė;
- FVM – fotovoltinis modulis;
- GF – geriausios įtampos fiksavimo algoritmas, (angl. BFV – *Best Fixed Voltage*);
- IncCond – didėjančio laidžio algoritmas, (angl. *Incremental Conductance*);
- P&O – keitimo ir stebėjimo algoritmas, (angl. *Pertub & Observe*);

- SBS – standartinės bandymo sąlygos, (angl. *STC – Standard Test Conditions*);
- SGS – saulės galios srautas;
- TSO – taškų spiečiaus optimizavimo algoritmas, (angl. *PSO – Particle Swarm Optimization*).

Turinys

| | |
|--|----|
| IVADAS | 1 |
| Problemos formulavimas | 1 |
| Darbo aktualumas | 2 |
| Tyrimų objektas | 3 |
| Darbo tikslas | 3 |
| Darbo uždaviniai | 3 |
| Tyrimų metodika | 3 |
| Darbo mokslinis naujumas | 3 |
| Darbo rezultatų praktinė reikšmė | 4 |
| Ginamieji teiginiai | 4 |
| Darbo rezultatų aprobavimas | 5 |
| Disertacijos struktūra | 6 |
| 1. FOTOVOLTINIŲ JĖGAINIŲ SANDAROS, VALDYMO METODŲ IR JŲ MATEMATINIŲ MODELIŲ ANALIZĖ | 7 |
| 1.1. Fotovoltinių jėgainių plėtra | 7 |
| 1.2. Fotovoltinio elemento ir modulio veikimas bei savybės | 9 |
| 1.3. Fotovoltinių modulių tipai | 13 |
| 1.4. Fotovoltinės jėgainės struktūra | 15 |
| 1.5. Didžiausios galios taško sekimo algoritmai | 17 |
| 1.6. Apėjimo diodų ir šešėlių įtaka fotovoltinei jėgainei | 22 |
| 1.7. Dirbtinių neuronų tinklų taikymas fotovoltinėje jėgainėje | 24 |
| 1.8. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas | 27 |

| | |
|--|------|
| 2. FOTOVOLTINĖS JĖGAINĖS MATEMATINIŲ MODELIŲ SUDARYMAS | 29 |
| 2.1. Pavienio fotovoltinio modulio matematinio modelio sudarymas | 30 |
| 2.2. Modulio temperatūros kitimą įvertinantis matematinis modelis..... | 35 |
| 2.3. Didžiausios galios taško sekimo modelis | 40 |
| 2.4. Dirbtinių neuronų tinklo panaudojimas fotovoltinės jėgainės modelyje..... | 43 |
| 2.5. Matematinis fotovoltinės jėgainės modelis..... | 47 |
| 2.6. Antrojo skyriaus išvados..... | 48 |
| 3. FOTOVOLTINĖS JĖGAINĖS TYRIMAS NEPROGNOZUOJAMOMIS APLINKOS SĄLYGOMIS..... | 51 |
| 3.1. Matematinų modelių patikra..... | 52 |
| 3.2. Didėjančio laidžio algoritmo tyrimas..... | 55 |
| 3.3. Fotovoltinės jėgainės tyrimas esant kintančiam saulės galios srautui..... | 58 |
| 3.4. Fotovoltinės jėgainės tyrimas tolygiai kintant saulės galios srautui ir palaikant fotovoltinių modulių temperatūrą nekintančią | 61 |
| 3.5. Fotovoltinės jėgainės tyrimas chaotiškai kintant saulės galios srautui ir fotovoltinių modulių temperatūrai | 64 |
| 3.6. Dirbtinių neuronų tinklų įtaka fotovoltinės jėgainės našumui | 66 |
| 3.7. Trečiojo skyriaus išvados | 71 |
| BENDROSIOS IŠVADOS | 73 |
| LITERATŪRA IR ŠALTINIAI..... | 75 |
| AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .. | 83 |
| SUMMARY IN ENGLISH..... | 85 |
| PRIEDAI ¹ | 101 |
| A priedas. Matematinų modelių patikrai naudota įranga..... | 101 |
| B priedas. Fotovoltinės jėgainės 15 valandų trukmės veikimo duomenų masyvai.. | 103 |
| C priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje..... | 105 |
| D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos..... | 1066 |

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Contents

| | |
|--|-------|
| INTRODUCTION | 1 |
| Problem formulation..... | 1 |
| Relevance of the thesis | 2 |
| The object of the research..... | 3 |
| The aim of the thesis | 3 |
| The objectives of the thesis | 3 |
| Research methodology | 3 |
| Scientific novelty of the thesis | 3 |
| Practical value of the research findings | 4 |
| The Defended statements | 4 |
| Approval of the research findings | 5 |
| The structure of the dissertation | 6 |
| 1. ANALYSIS OF CONTROL METHODS OF SOLAR POWER PLANTS AND THEIR MATHEMATICAL MODELS..... | 7 |
| 1.1. Development of photovoltaic power plants | 7 |
| 1.2. Features of photovoltaic cell and photovoltaic module | 9 |
| 1.3. Types of photovoltaic modules | 13 |
| 1.4. The structure of photovoltaic solar power plant | 16 |
| 1.5. Different algorithms of maximum power point tracking | 17 |
| 1.6. Bypass diodes and shadows effect to the solar power plant | 22 |
| 1.7. Application of artificial neural networks in solar power plant | 24 |

| | |
|---|-----|
| 1.8. Conclusions of the chapter 1 and allocating tasks for dissertation | 27 |
| 2. IMPLEMENTATION OF SOLAR POWER PLANT IN MATHEMATICAL MODELS | 29 |
| 2.1. Mathematical model of photovoltaic module | 30 |
| 2.2. Mathematical model of temperature variation | 35 |
| 2.3. Mathematical model of maximum power point tracking | 40 |
| 2.4. Artificial neural networks in mathematical models | 43 |
| 2.5. Mathematical model of solar power plant | 47 |
| 2.6. Conclusions of the chapter 2 | 48 |
| 3. INVESTIGATION OF SOLAR POWER PLANT OPERATION UNDER UNPREDICTABLE ENVIRONMENT CONDITIONS | 51 |
| 3.1. Verification of mathematical models..... | 52 |
| 3.2. Investigation of Incremental Conductance algorithm..... | 55 |
| 3.3. Investigation of solar power plant operation under different solar power flux... | 58 |
| 3.4. Investigation of solar power plant operation under different solar power flux and photovoltaic module temperature | 60 |
| 3.5. Investigation of solar power plant operation under different solar power flux when photovoltaic module temperature is kept in constant | 62 |
| 3.6. Influence of artificial neural networks in performance of solar power plant..... | 65 |
| 3.7. Conclusions of the chapter 3 | 69 |
| GENERAL CONCLUSIONS | 71 |
| REFERENCES | 73 |
| LIST OF THE SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION | 81 |
| ANNEXES ¹ | 103 |
| Annex A. Equipment for inspection for mathematical models | 103 |
| Annex B. Data array of solar power plant operating during 15 hours | 104 |
| Annex C. The co-authors agreements to present publications material in the doctoral dissertation | 106 |
| Annex D. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation | 107 |

¹The annexes are supplied in the enclosed compact disc

Įvadas

Problemos formulavimas

Kiekvienais metais visame pasaulyje elektros energijos poreikis didėja (World Nuclear Association 2015). Siekiant sumažinti į aplinką išmetamų teršalų kiekį, elektros energijos gavimui iškastinis kuras vis dažniau keičiamas atsinaujinančiais energijos šaltiniais. Siekiant atitikti elektros energijos poreikius statomos naujos elektros jėgainės, kurios naudoja vėjo, vandens, saulės energiją ir kitus atsinaujinančius energijos šaltinius. Šiuo metu daugelyje valstybių fotovoltinių jėgainių statyba remiama, skiriamos dotacijos. Lietuvoje elektros energija iš fotovoltinių jėgainių perkama didesniu tarifu nei nusistovėjusi rinkos kaina (Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija 2015). Įvertinus kitų Europos valstybių, kuriose seniai remiama fotovoltinių jėgainių statyba, patirtį galima teigti, kad skirtumas tarp supirkimo ir pardavimo kainų palaipsniui išnyks.

Taigi yra svarbu, kad fotovoltinė jėgainė visą eksploatacijos laikotarpį veiktų efektyviai ir esant bet kokioms aplinkos sąlygoms gebėtų panaudoti didžiausią saulės energijos dalį ir generuoti galimai didesnę galią.

Fotovoltinės jėgainės ir jos moduliai valdyti naudojami valdikliai. Dauguma valdiklių yra lėti arba netikslūs, todėl ne visa saulės energija paverčiama elektros energija. Dėl netobulai veikiančio valdiklio fotovoltinė jėgainė veikia neefektyviai.

Disertacijoje sprendžiama fotovoltinės jėgainės efektyvaus valdymo mokslinė problema.

Darbo aktualumas

Siekiant efektyviai panaudoti saulės energiją reikia palaikyti fotovoltinės jėgainės darbo režimą didžiausios galios taške. Visos fotovoltinės jėgainės darbo efektyvumas priklauso nuo pasirinkto valdiklio. Valdiklis privalo greitai ir tiksliai aptikti didžiausią galios tašką, esant bet kokioms aplinkos sąlygoms. Vienas pagrindinių veiksnių trikdančių valdiklio efektyvų veikimą yra debesuotą dieną susidarantys ant jėgainės modulių šešėliai, kurie dėl vėjo dažnai tampa neprognozuojami. Itin sudėtinga palaikyti didžiausios galios darbo režimą, kai šešėlis susidaro tik ant dalies fotovoltinės jėgainės modulių. Tokiu atveju jėgainės darbo režime gali būti keletas didžiausios galios taškų: lokalūs ir globalus. Kai valdiklis nesugeba aptikti globalaus didžiausios galios taško ir fotovoltinės jėgainės darbo režimas lieka lokaliame didžiausios galios taške, fotovoltinė jėgainė generuoja mažesnę galią. Taigi fotovoltinė jėgainė krentančią saulės energiją panaudoja neefektyviai.

Kitas veiksnys neleidžiantis efektyviai panaudoti saulės energijos yra kintanti fotovoltinio modulio temperatūra. Nors saulėtą dieną į jėgainės paviršių patenka daugiausiai saulės energijos, tačiau fotovoltiniai moduliai labiau įšyla. Aukštesnėje temperatūroje fotovoltinio modulis darbas mažiau efektyvus. Siekiant generuoti didesnę galią jėgainėje, būtina įvertinti fotovoltinių modulių temperatūros įtaką.

Dauguma valdiklių sekančių didžiausios galios tašką veikia atvirosios grandinės įtampos ir trumpojo jungimo srovės tikrinimo principu. Taip sekant didžiausios galios tašką (DGT) yra didelė tikimybės pažeisti fotovoltiniame modulyje esančias celes. Dėl šios priežasties dalis modulio ar visas modulis gali veikti neefektyviai. Taigi reikia tobulinti didžiausios galios taško sekimo metodus.

Darbo aktualumas glūdi siūlomame intelektualus didžiausios galios taško sekimo metode pagrįstame dirbtinių neuronų tinklo panaudojimu. Dirbtinių neuronų tinklas apsimokęs geba greitai ir tiksliai aptikti fotovoltinės jėgainės DGT ir ženkliai padidinti jėgainės darbo efektyvumą.

Darbe keliamos ir tikrinamos tokios aktualios hipotezės:

- intelektualijų metodų taikymas, sekant didžiausios galios tašką fotovoltinėse jėgainėse, leidžia sparčiai ir tiksliai aptikti didžiausios galios tašką;
- praktikoje įgyvendintas intelektualus didžiausios galios taško sekimo metodas leidžia padidinti fotovoltinės jėgainės našumą nekeičiant jėgainės fotovoltinių modulių ir nedidinant jų kiekio.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – fotovoltinių jėgainių valdymo algoritmai ir jų pritaikymas bet kokioms aplinkos sąlygoms bei fotovoltinių jėgainių apkrovos keitimo būdai sekant didžiausios galios tašką.

Darbo tikslas

Sukurti ir ištirti didžiausios galios taško sekimo metodiką leidžiančią padidinti fotovoltinės jėgainės našumą esant greitai besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami tokie uždaviniai:

1. Sukurti matematinius modelius ir ištirti fotovoltinės jėgainės, veikiančios su didžiausią galią sekančiu valdikliu, našumą.
2. Pasiūlyti metodiką leidžiančią padidinti fotovoltinės jėgainėsose taikomo didžiausios galios taško sekimo algoritmo efektyvumą.
3. Ištirti aplinkos sąlygų kitimo įtaką fotovoltinės jėgainės našumui.
4. Pasiūlyti efektyvų fotovoltinės jėgainės apkrovos keitimo būdą.

Tyrimų metodika

Darbe taikomi valdymo sistemų modeliavimo ir statistinės analizės metodai. Hipotezės tikrinamos sudarant modelius ir vykdant imitacinius skaičiavimus bei eksperimentinius tyrimus.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektronikos inžinerijos mokslui reikšmingi rezultatai:

1. Imitaciniais skaičiavimais įrodyta, kad fotovoltinės jėgainės našumas stipriai įtakojamas besikeičiančio saulės galios srauto, todėl didžiau-

siam fotovoltinės jėgainės efektyvumui pasiekti, sukurtas greitas ir tikslus apkrovos priderinimo metodas.

2. Siekiant padidinti fotovoltinės jėgainės našumą esant greitai besikeičiančioms aplinkos sąlygoms, parinkti ir pritaikyti spartūs dirbtinių neuronų tinklai skirti sekti didžiausios galios tašką.
3. Pasiūlyta efektyvi apkrovos keitimo metodika leidžianti padidinti fotovoltinės jėgainės efektyvumą.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Rengiant disertaciją buvo gauti tokie praktinę vertę turintys rezultatai:

1. Sudaryti matematiniai modeliai tinka fotovoltinės jėgainės įtaisų valdymui ir jų efektyvumo patikrinimui.
2. Tyrimų metu suformuluotos rekomendacijos skirtos didžiausios galios taško sekimo fotovoltinėse jėgainėse problemų sprendimui ir patbulinimų įgyvendinimui.
3. Tyrimų metu sudarytas praktiniam naudojimui pritaikytas fotovoltinės jėgainės valdymo metodas, adaptuojantis realias veikimo sąlygas.
4. Darbo rezultatai naudojami Europos Sąjungos dalinai finansuojamame projekte: Išmanaus daugiafunkcinio fotoelektrinio pastato fasado elemento kūrimas ir pramoninės gamybos demonstravimas SMART-FLeX (SMART-FLEX: Demonstration at industrial scale of the FLeXible manufacturing of SMART multifunctional photovoltaic building elements).

Ginamieji teiginiai

1. Sudarytas fotovoltinės jėgainės modelis leidžia imituoti procesus jėgainėje su neapibrėžtimi neviršijančia $\pm 1,9$ % ir yra tinkamas fotovoltinių jėgainių darbo efektyvumo prognozavimui ir jų valdymui.
2. Fotovoltinių jėgainių valdymui pritaikytos intelektualios didžiausios galios sekimo sistemos, grįstos dirbtinių neuronų tinklu ir veikiančios pagal sukurtą algoritmą, Lietuvos sąlygomis padidina iki 17 % fotovoltinėje jėgainėje pagaminamos elektros energijos kiekį.

3. Priverstinai aušinant realiomis eksploatacinėmis sąlygomis veikiančius fotovoltinius modulius Lietuvos sąlygomis padidina iki 31 % fotovoltinėje jėgainėje pagaminamos elektros energijos kiekį.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 6 moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose: du – straipsniai žurnaluose, referuojamuose *Thomson Reuters Web of Knowledge* duomenų bazėje *Web of Science* (Vasarevičius, Martavičius, Pikutis 2012, Pikutis, Vasarevičius, Martavičius. 2014), keturi – mokslo žurnaluose, referuojamuose kitose tarptautinėse duomenų bazėse (Vasarevičius, Pikutis 2012, Pikutis 2014, Pikutis 2015, Pikutis, Vasarevičius, Martavičius 2015).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 9 mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Pikutis, M. 2011. Saulės elementų maksimalios galios taško sekimas taikant dirbtinius neuronų tinklus. Keturioliktoji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 2011 m. kovo 18 d.
- Pikutis, M. 2012. IncCond didžiausios galios taško sekimo algoritmo tyrimo rezultatai. Penkioliktoji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 2012 m. kovo 16 d.
- Vasarevičius D., Martavičius R., Pikutis M. 2012. Application Of Artificial Neural Networks For Maximum Power Point Tracking In Photovoltaic Panels. Šešioliktoji tarptautinė konferencija „*Elektronika 2012*“. Palanga, 2012 m. birželio 18–20 d.
- Pikutis, M. 2013. Didžiausios galios taško sekimas daugiamodulinėse saulės jėgainėse. Šešioliktoji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 2013 m. kovo 15 d.
- Pikutis M., Vasarevičius D., Martavičius R. 2013. Maximum power point tracking in solar power plants under partially shaded condition. Septynioliktoji tarptautinė konferencija „*Elektronika 2013*“. Palanga, 2013 m. birželio 17–19 d.
- Pikutis, M. 2014. Aplinkos temperatūros poveikis modulio darbinėms charakteristikoms ir jėgainės našumui. Septynioliktoji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 2014 m. kovo 21 d.

- Pikutis, M. 2014. SmartFlex konferencijoje „*Second Workshop on Building–Integrated Photovoltaics*“ Le Bourget du Lac, Prancūzija 2014 m. rugsėjo 15–16 d.
- Pikutis, M. 2015. Temperatūros įtaka fotovoltinei jėgainei debesuotą dieną. Aštuonioliktoji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 2015 m. kovo 20 d.
- Pikutis, M. 2015. Fotovoltinės elektrinės modelio kūrimas ir jos elektroninio valdiklio algoritmų tyrimas ir tobulinimas. FTMC PFI Medžiagotyros ir elektros inžinerijos mokslinis seminaras. Vilnius, Lietuva 2015 birželio 17 d.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra keturi priedai.

Darbo apimtis yra 101 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 31 numeruotos formulės, 39 paveikslai ir 6 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 78 literatūros šaltiniai.

Fotovoltinių jėgainių sandaros, valdymo metodų ir jų matematinių modelių analizė

Šiame skyriuje apžvelgiamos fotovoltinių jėgainių plėtros tendencijos, analizuojamas fotovoltinio elemento ir modulio veikimas, savybės, aplinkos temperatūros įtaka fotovoltiniam moduliui, palyginamos įvairių tipų fotovoltinių modulių charakteristikos, analizuojama fotovoltinės jėgainės struktūra, jos darbo metu susidariusių šešėlių įtaka fotovoltinei jėgainės darbui, dirbtinių neuronų tinklų pritaikomumas fotovoltinės jėgainės valdymo elektroninėje sistemoje. Skyrius pabaigiamas analizės metu padarytomis išvadomis ir jų pagrindu formuluojami disertacijos uždaviniai.

1.1. Fotovoltinių jėgainių plėtra

Per metus į žemės paviršių patenka $1,08 \cdot 10^{19}$ kWh saulės energijos, kai tuo tarpu bendras žmonijos metinis energijos poreikis yra 10 000 kartų mažesnis (Quaschnig 2005). Nepaisant tokio didelio energijos srauto, tik nedidelė jo dalis yra naudojama, kaip atsinaujinantis energijos šaltinis. Dalis šios energijos saulės kolektorių pagalba panaudojama šilto vandens ruošimui. Kita dalis foto-

voltinėse jėgainėse paverčiama elektros energija. 2013 metais Lietuvoje iš saulės energijos buvo pagaminta 45 GWh elektros energijos (Mačiulis, Galdikas 2015). Pateiktoje 1.1 lentelėje matosi 2014 metais veikusių fotovoltinių jėgainių galia ir jų kiekis (Mačiulis, Galdikas 2015).

1.1 lentelė. Lietuvoje 2014 m. rugsėjo mėn. veikusių fotovoltinių jėgainių galios charakteristika

Table 1.1. Characteristics of solar power plants in Lithuania in 2014 September

| Jėgainės galia, kW | Kiekis, vnt. | Visa galia, MW |
|-----------------------|-----------------|-------------------|
| 0–10 | 170 | 1,3 |
| 11–27 | 158 | 2,9 |
| 28–32 | 1600 | 47,6 |
| 33–100 | 42 | 4,1 |
| 101–999 | 10 | 5,9 |
| 1000–3000 | 4 | 8,0 |
| VISO | 1984 | 69,8 |

Nors 1.1 lentelėje skaičiai nėra dideli, tačiau galima pasidžiaugti, žinant, kad tokia fotovoltinių jėgainių bendra galia buvo pasiekta tik per keletą metų, kurių metu buvo parankūs įstatyminiai aktai investuoti į jėgainių statybą. Fotovoltinės energetikos išsivystymą Lietuvoje apibūdina duomenys pateikti 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Fotovoltinė energetika Europos šalyse 2013 m.

Table 1.2. Solar energetics in Europe in 2013

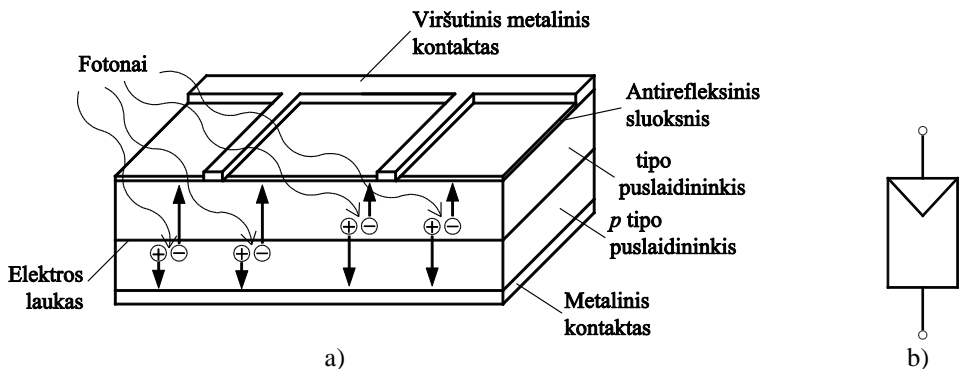
| Šalys | Instaliuota galia gyventojui, W/gyv. | Instaliuotos galios gy- ventojui santykis lygi- nant su Lietuva |
|--------------------------|---|---|
| Vokietija | 447 | 20 |
| Belgija | 267 | 12 |
| Čekija | 203 | 9 |
| Slovakija | 99 | 4 |
| Danija | 95 | 4 |
| Jungtinė Karalystė | 43 | 2 |
| Olandija | 40 | 3 |
| Lietuva | 23 | – |
| Latvija, Estija, Lenkija | 0,1–0,7 | – |
| ES (28 šalių vidurkis) | 156 | 7 |

Pirmieji tradiciniai fotovoltiniai elementai buvo pagaminti 1954 m., o jau po kelerių metų pradėti naudoti elektros energijos gamybai ir tiekimui dirbtiniuose žemės palydovuose (Lewis 2014). Šiomis dienomis yra statomos ištisos fotovoltinės jėgainės, kurių galingumas siekia ir viršija kelias dešimtis MW. Didžiausios 2014 metais baigtos statyti fotovoltinės jėgainės Kalifornijoje (JAV) galingumas siekia 550 MW (Peter 2014). Visų fotovoltinių jėgainių nepriklausomai nuo jų galios efektyviam panaudojimui reikalingos valdymo sistemos.

Apskritai fotovoltinės energetikos plėtrą dotuoja valstybės. Tai vykdoma padidinus pagamintos elektros energijos supirkimo kainą, kuri laikui bėgant mažinama. Norint palaikyti fotovoltinės energetikos rentabilumą, fotovoltinių jėgainių plėtotojai ieško būdų jėgainės efektyvumui padidinti. Vienas iš galimų efektyvumo didinimo būdų yra maksimalią dalį krintančio saulės energijos srauto paversti elektros energija.

1.2. Fotovoltinio elemento ir modulio veikimas bei savybės

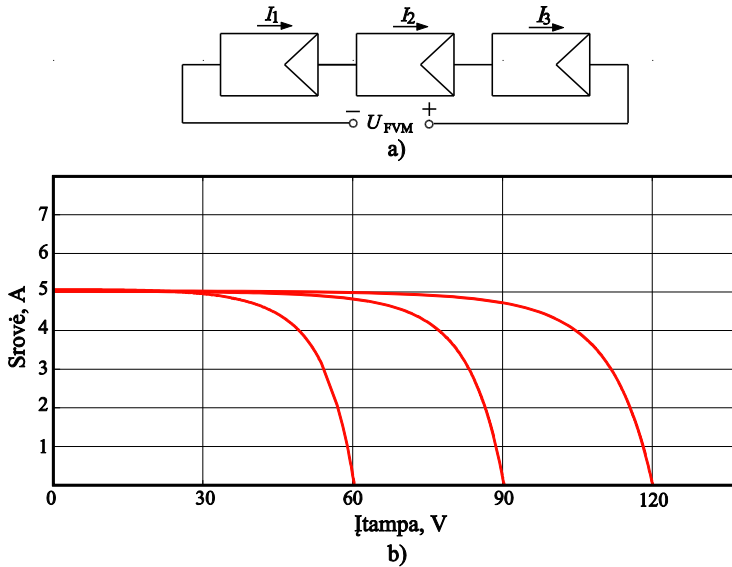
Fotovoltinio elemento struktūrinė schema paaiškinanti jo veikimą pateikta 1.1 paveiksle, a. Fotovoltinį elementą sudaro n- ir p-tipo puslaidininkio sluoksniai sudarantys p-n sandūrą, du metaliniai kontaktai ir saulės spindulių atspindžius mažinantis antirefleksinis sluoksnis.



1.1 pav. a) Fotovoltinio elemento struktūrinė schema,
b) fotovoltinio modulio grafinis žymuo schemose

Fig. 1.1. a) Structural diagram of a photovoltaic cell b) graphical symbol of photovoltaic module in schemes

Siekiant gauti p-tipo puslaidinikinį silicį, silicis legiruojamas medžiagos su mažesniu valentinių elektronų skaičiumi atomais. Dažniausiai naudojami boras ar aluminis. Kai silicis legiruojamas medžiagos su didesniu valentinių elektronų skaičiumi atomais yra gaunamas n-tipo puslaidininkinis silicis. Šiuo atveju dažnai yra naudojamas fosforas ar arsenas (Meier *et al.* 2001). Suformavus p-Si ir n-Si paviršiuose metalinius kontaktus, fotovoltinį elementą galima naudoti kaip energijos šaltinį ir jungti prie apkrovos.



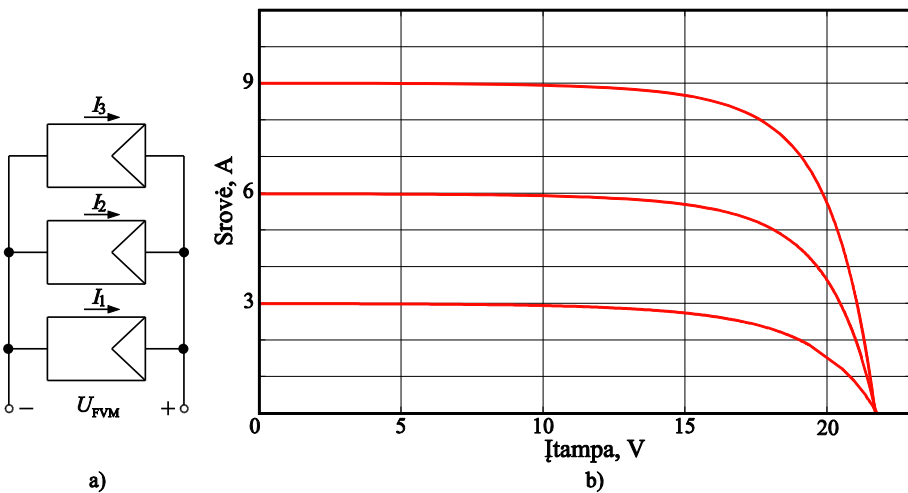
1.2 pav. a) Fotovoltinių modulių nuoseklaus jungimo schema, b) nuosekliai sujungtų fotovoltinių modulių voltamperinė charakteristika

Fig. 1.2. a) Scheme of photovoltaic modules connected in series, b) voltage-current characteristic of photovoltaic modules connected in series

Fotovoltinis elementas pradeda generuoti elektros energiją, kai saulės šviesa apšviečia p-n sandūrą. Krentantys saulės šviesos fotonai išmuša silicio elektronus iš valentinės į laidumo juostą (Miles *et al.* 2005). Silicio elektronai išmušami tik tuo atveju, jeigu fotono energija lygi arba didesnė už silicio puslaidininkio draustinių energijų juostos plotį. Kai atsiranda papildomi laisvieji krūvininkai, tai yra atsiradus elektronams laidumo juostoje ir skylutėms valentinėje juostoje, nusistovėjusi terminė laisvųjų krūvininkų pusiausvyra p-n sandūroje suardoma. Elektronai pernešami per p-n sandūrą į n-tipo Si, o skylutės į p-tipo Si. Taigi sandūros srityje susidaro laisvų krūvininkų. (Akram *et al.* 2011). Veikiami susidariusio elektrinio lauko pertekliniai elektronai iš n-tipo silicio metaliniu kontaktu juda išorine grandine per apkrovą iki pasiekia p-tipo Si. Elektronams susitikus

su priešinga kryptimi judančiomis skylutėmis – rekombinuoja (Shih-Wei *et al.* 2013). Tokiu būdu gaminama pastovi elektros srovė, kuri teka tol kol fotovoltinis elementas apšviečiamas saulės šviesa ir generuoja laisvuosius krūvininkus (Radziemska 2003).

Kadangi vieno FV elemento galia yra nedidelė, jie dažniausiai jungiami į nuoseklias arba lygiagrečias grandines. Fotovoltinių elementų kiekis grandinėje priklauso nuo modulio galingumo. Kuo elementų daugiau, tuo modulio galia yra didesnė. Sudaryti fotovoltinį modulį iš daugelio fotovoltinių elementų nėra naujiena dėl kelių pagrindinių priežasčių. Pirmiausia, pagaminus modulį iš daugelio elementų, jis tampa sunkus ir itin didelis, todėl yra nepatogu statant fotovoltines jėgaines. Kita labai svarbi priežastis kodėl negaminami dideli fotovoltiniai moduliai, tai padidėjusi neefektyvaus veikimo rizika. Esant dideliui moduliiui yra didesnė tikimybė, kad tik daliai modulio patekus į šešėlį visas modulis veiks šešėlyje esančių FV elementų sumažėjusiu našumu (Cupertino *et al.* 2012). Todėl dažniausiai FV modulį sudaro 60 FV elementų (6×10). Fotovoltinių jėgainių schemose fotovoltinis modulis yra žymimas simboliu pateiktu 1.1 paveiksle, b.



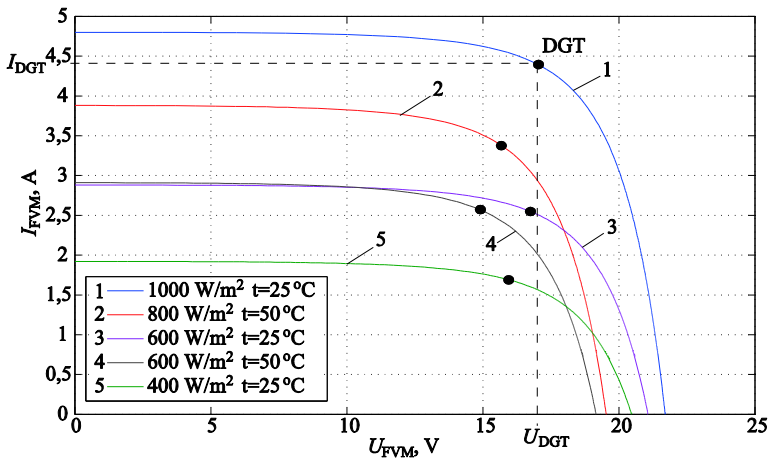
1.3 pav. a) Fotovoltinių modulių lygiagretaus jungimo schema, b) lygiagrečiai sujungtų fotovoltinių modulių voltamperinė charakteristika

Fig. 1.3. a) Scheme of photovoltaic modules connected in parallel, b) voltage-current characteristic of photovoltaic modules connected in parallel

Pagaminti fotovoltiniai moduliai taip pat gali būti jungiami į lygiagrečias ar nuoseklias grandines. 1.2 paveiksle pateikta nuosekliai sujungtų FV modulių grandinės schema ir jos charakteristikos. Tai yra dažniausiai naudojamas jungimas. Tokiu būdu jungiant visos grandinės srovė išlieka vienoda, nepaisant kiek

vienodo tipo FV modulių bus sujungta (Dobrzański *et al.* 2009). Jungiant modulių nuosekliu jungimo būdu, visos grandinės įtampa priklauso nuo sujungtų FV modulių skaičiaus. Kuo modulių daugiau, tuo įtampa grandinėje yra didesnė (Savita *et al.* 2010). Daugumos fotovoltinių modulių charakteristikos leidžia juos nuosekliai jungti iki 1000 V įtampos vienoje grandinėje.

Atskirais atvejais moduliai gali būti jungiami lygiagrečiai (Lijun *et al.* 2009), kaip pateikta 1.3 paveiksle. Dažniausiai tokiu būdu jungiami moduliai, kurių srovė yra labai maža, o įtampa didelė. Panašias charakteristikas turi amorfiniai fotovoltiniai moduliai. Taip gali būti jungiami ir standartiniai moduliai, kai tai leidžia pasirinktas keitiklis. Taip pat yra galimas ir mišrus modulių sujungimas, kai lygiagrečiai sujungiamos, jau nuosekliai sujungtos modulių grandinės (Fadi 2014). Tokiu būdu gaunama reikiama įtampa bei srovė.



1.4 pav. Didžiausios galios taškas esant skirtingam saulės galios srautui ir temperatūroms

Fig. 1.4. Maximum power point depending on a different solar radiation and temperature

1.4 paveiksle pavaizduota, iš fotovoltinių elementų sudaryto fotovoltinio modulio voltamperinės charakteristikos, kai į jį patenka skirtingas saulės galios srautas ir, kai modulio temperatūra padidėja nuo 25 $^{\circ}C$ iki 50 $^{\circ}C$. Charakteristikos apibūdina saulės galios srauto ir temperatūros įtaką vieno fotovoltinio modulio darbo režimui modulyje. Tašku voltamperinėje charakteristikoje pažymėtas režimas, kai fotovoltinis modulis į apkrovą atiduoda didžiausią galią – didžiausios galios taškas (DGT). Pirmoji, antroji ir trečioji kreivės charakterizuoja didžiausios galios darbo tašką esant skirtingam apšviestumui ir tai pačiai tempera-

tūrai. Ketvirtoji kreivė atvaizduoja modulio veikimą, kai į jį patenka 600 W/m^2 saulės galios srautas ir pasikeičia tik jo temperatūra. Penktoji kreivė apibūdina dviejų faktorių poveikį saulės modulio veikimui – padidėja saulės galios srautas ir pakyla jo temperatūra.

Iš pirmos, antros ir trečios kreivių palyginimo matyti, kad esant vienodai modulio temperatūrai ir mažėjant tik saulės galios srautui, ženkliai krenta ir modulio srovė. Kai saulės galios srautas nekinta, o temperatūra pakyla, fotovoltinio modulio srovė beveik nepakinta, tačiau sumažėja modulio įtampa. Dėl sumažėjusios įtampos sumažėja fotovoltinio elemento atiduodama į apkrovą galia 9 W (žr. kreives 2 ir 4). Taigi fotovoltinio modulio momentinė galia yra didesnė, kai jo temperatūra yra žemesnė.

Darbe (Swapnil *et al.* 2013) pateiktais tyrimo rezultatais parodyta, kad didėjant modulio temperatūrai jo gaminamos elektros energijos galia esant tokiam pačiam saulės galios srautui atitinkamai mažėja.

Taigi galima teigti, kad modulio charakteristikos priklauso ne tik nuo saulės galios srauto, bet ir nuo modulio temperatūros ir būtina surasti priemonių šiems pokyčiams sumažinti.

1.3. Fotovoltinių modulių tipai

Fotovoltinių elementų yra įvairių dydžių ir skirtingo efektyvumo. Fotovoltinių elementų naudingumo koeficientas priklauso nuo elemento konstrukcijoje naudojamų medžiagų, jų kiekio, taip pat priklauso nuo gamybos technologijos. Šie veiksniai nulemia kokia dalis saulės energijos bus paversta į elektros energiją ir kiek šios energijos bus nepanaudota dėl atspindžių. Fotovoltinio elemento efektyvumą pagal galią didžiausios galios taške apskaičiuojamas taip (Farret and Simoes 2006; Skoplaki and Palyvos 2009):

$$\eta = \frac{P_P}{A_M E}, \quad (1.1)$$

čia P_P – didžiausia fotovoltinio elemento galia standartinėmis bandymo sąlygomis (pikinė galia), A_M – fotovoltinio elemento plotas, E – visas saulės spinduliuotės, krentančios į fotovoltinio elemento paviršių, galios srautas.

Saulės energijos paverčiamos elektros energija kiekis pirmiausiai priklauso nuo fotovoltinių elementų tipo. Mažiausią naudingumo koeficientą turi amorfiniai bei plonasluoksniai fotovoltiniai elementai. Brangiausi, tačiau efektyviausiai gebantys paversti saulės energiją elektros energija yra monokristaliniai bei dvipusiai (angl. *bifacial*) fotovoltiniai elementai (Lorenzo 1994). Kiekvienais metais FV elementų naudingumo koeficientas didinamas. Tačiau šiuo metu plačiai taikomi fotovoltiniai elementai, kurių naudingumo koeficientas neviršija 22 %.

Šiuo metu Lietuvoje vykdomi tyrimai, kurių metu mokslininkai ieško būdų kaip efektyviau aptikti fotovoltinių elementų defektus, optimizuoti formavimo procesus (Bukauskas *et al.* 2015). Šio darbo vadovo A. Šetkus nuomone Visa tai gali leisti viršyti rekordinius fotovoltinio elemento iš silicio našumus apie 25 % ir labai sumažinti gamybos kaštus.

1.3 lentelė. Skirtingų tipų fotovoltinių modulių parametrai

Table 1.3. Parameters of different types of photovoltaic modules

| Modulio parametras | Modulio tipas | | |
|------------------------------|---|-----------------|-----------|
| | Monokristalinis | Polikristalinis | Amorfinis |
| Didžiausia galia, Wp | 250 | 250 | 130 |
| Didžiausios galios įtampa, V | 31,10 | 30,10 | 46,10 |
| Didžiausios galios srovė, A | 8,05 | 8,31 | 2,82 |
| Tuščios veikos įtampa, V | 37,80 | 37,40 | 60,40 |
| Trumpo jungimo srovė, A | 8,28 | 8,83 | 3,41 |
| Modulio efektyvumas, % | 14,91 | 15,40 | 9,3 |
| Maksimali sistemos įtampa, V | 1000 | | |
| Standartinės bandymo sąlygos | 1000 W/m ² , oro masė 1,5, 25 °C | | |

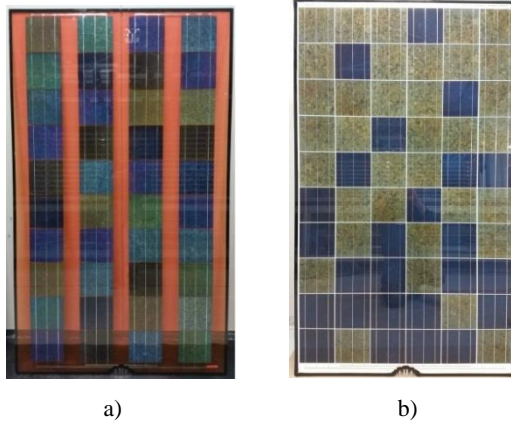
1.3 lentelėje pateikta trijų tipų fotovoltinių modulių darbinės charakteristikos esant standartinėms bandymo sąlygoms. Nors monokristaliniai elementai laikomi šiuo metu didžiausio efektyvumo, tačiau dėl gamybos technologijos fotovoltinio elemento forma yra labai užapvalintais kampais (Saga, 2010). Šiuo atveju panaudojamas ne visas modulio plotas. Todėl skaičiuojant modulio efektyvumą monokristaliniai moduliai nusileidžia polikristaliniams moduliams. Amorfinių modulių efektyvumas yra ženkliai mažesnis už šiuo metu pirmaujančių monokristalinių bei polikristalinių modulių. Tačiau amorfinių modulių kaina taip pat ženkliai skiriasi lyginant su pastaraisiais. Taigi nepaisant jų pigumo, ne daugelis dėl modulių mažo efektyvumo ir greitos elektrinių charakteristikų degradacijos ryžtasi amorfinius modulius naudoti fotovoltinėse jėgainėse.

Šiuo metu vis didesnę dalį rinkos užima stiklas-stiklas tipo fotovoltiniai moduliai. Tokį fotovoltinės energetikos plėtotojų pasirinkimą lemia tokios pagrindinės priežastys:

- Ilgesnis efektyvaus veikimo laikotarpis lyginant su įprastais vieno stiklo moduliais. Stiklas-stiklas tipo moduliai daugiau kaip 30 metų išlaiko 80 % veikimo efektyvumą, kai tuo tarpu įprastiniai tokiu efektyvumu apibūdinami – iki 15 metų.
- Universalus modulių panaudojimas. Naudojant stiklas-stiklas tipo modulius, juos galima diegti ne tik kaip atskirą fotovoltinę jėgainę, bet integruoti į pastatus. Kadangi moduliai gali būti ir peršviečiami, todėl yra naudojami kartu su stiklo paketu ir įmontuojami į langus. Taigi jie gali

būti naudojami kaip papildomas sluoksnis ant pastato, vienu metu generuojantis elektros energiją ir praleidžiantis saulės šviesą į pastato vidų.

Šiuolaikinės technologijos leidžia gaminti pačius įvairiausius modulius, kurie atitinka nestandartinių sprendimų ieškančių žmonių lūkesčius. 1.5 paveiksle pateiktos fotografijos apibūdinančios fotovoltinių modulių įvairovę ir galimybes.



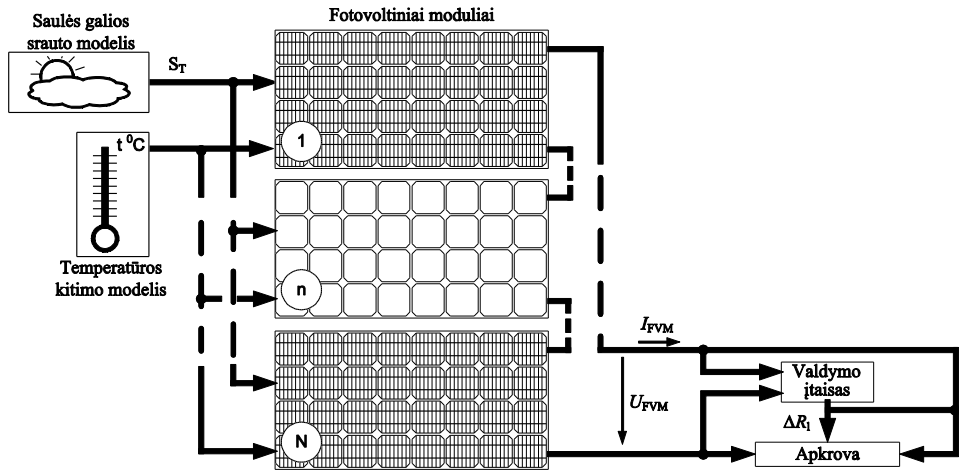
1.5 pav. a) Fotovoltinis modulis sudarytas iš šešių skirtingų fotovoltinių elementų
b) fotovoltinis modulis sudarytas iš dviejų skirtingų fotovoltinių elementų
Fig. 1.5. a) Photovoltaic modules of six different types of photovoltaic cells,
b) photovoltaic modules of two different types of photovoltaic cells

Taigi fotovoltinių modulių ir jų parametrų įvairovė įtakoja jų matematinių modelių sudarymą. Sudarant matematinius fotovoltinių modulių modelius, būtina atsižvelgti į modeliuojamo modulio elektrines savybes, kurios priklauso nuo modulio dydžio, naudojamų fotovoltinių elementų, gamybos technologijos bei kitų veiksnių. Pasirinkus konkretų FV modulį, galima tiksliai sudaryti matematinį modelį ir juo pasirėmus praktiškai be klaidų detalai ištirti realius FV modulius.

1.4. Fotovoltinės jėgainės struktūra

Statoma labai daug ir įvairių fotovoltinių jėgainių, tačiau visų jėgainių struktūra ir jų valdymo principai išlieka panašūs. 1.6 paveiksle pateikta struktūrinė FV jėgainės schema. Iš schemos matyti, kad fotovoltinę jėgainę gali sudaryti pasirinktas skaičius nuosekliai sujungtų fotovoltinių modulių. Tikslų FV modulių skaičių apsprendžia pasirinkto įtampos keitiklio galimybės. Kiekvieną fotovoltinį modulį gali sudaryti skirtingas fotovoltinių elementų kiekis, kuris priklauso

nuo FV modulio tipo. Fotovoltiniai moduliai yra apšviečiami saulės šviesa, tai yra į FV modulio paviršių krenta saulės galios srautas, kuris kinta esant įvairioms aplinkos sąlygoms (Hamrouni *et al.* 2008).



1.6 pav. Fotovoltinės jėgainės struktūrinė schema

Fig. 1.6. Structural diagram of a solar power plant

Fotovoltiniai moduliai veikiami saulės galios srauto ir temperatūros generuoja įtampą U_{FVM} ir kuria srovę I_{FVM} , kuri teka per apkrovą. Fotovoltinė jėgainės apkrovą gali reguliuoti pasirinktas algoritmas (Pradeep *et al.* 2012). Visų valdymo algoritmų paskirtis yra ta pati – garantuoti efektyvų jėgainės veikimą. Dažniausiai algoritmas lygindamas fotovoltinės jėgainės išmatuotas trumpojo jungimo srovės I_{tr} ir tuščios veikos įtampos U_{aj} vertes su prieš tai buvusiomis, reguliuoja jėgainės apkrovą – ją padidina arba sumažina žingsniu ΔR . Kaip apkrova jėgainėje gali būti naudojamas energijai kaupti skirti gilaus iškrovimo akumuliatoriai, elektros įtaisai ar įrenginiai naudojantys momentinę elektros energiją. Taip pat vienas dažniausiai taikomų apkrovos sukūrimo būdų yra jėgainės prijungimas prie centralizuotų elektros tinklų.

Fotovoltiniai moduliai veikiami saulės spindulių ir kitų veiksnių įšyla. Tai keičia jo darbo charakteristikas. Todėl eksploatuojant fotovoltinę jėgainę ypatingas dėmesys yra skiriamas modulių temperatūrai.

Tiriant fotovoltinės jėgainės, analizuojant jų darbo efektyvumą, būtina turėti fotovoltinės jėgainės imitacinį modelį įvertinantį jėgainės struktūrą, veikimo principus ir įgalinantį imituoti įvairias aplinkos sąlygas pasirinktoje pasaulio vietovėje. Šiuo metu literatūroje aprašytų modelių su tokiais galimybėmis nėra.

1.5. Didžiausios galios taško sekimo algoritmai

Siekiant išsamiau paaiškinti didžiausios galios taško sekimo būtinumą, 1.7 paveiksle pateiktas pavyzdys, kai fotovoltinis modulis veikia sekant DGT ir jo nesebant. 1.7 paveiksle pavaizduota 75 W fotovoltinio modulio voltamperinė ir galios charakteristikos standartinėmis bandymo sąlygomis. Jeigu šis fotovoltinis modulis būtų panaudotas 12 V akumuliatoriaus įkrovimui, nenaudojant jokių papildomų didžiausios galios taško sekimo valdiklių, tuomet fotovoltinis modulis veiktų akumuliatoriaus režimu ties 12 V įtampos riba. Esant tokiam režimui modulis generuotų tik 53 W galią vietoj galimos 75 W galios.

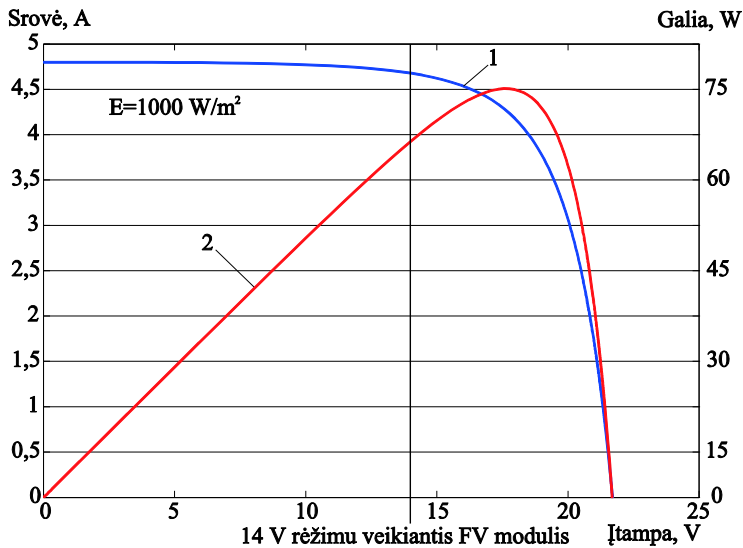
Kad fotovoltinis modulis veiktų efektyviai yra naudojami įkrovikliai su didžiausios galios taško sekimu fotovoltiniame modulyje. Sekant DGT fotovoltinis modulis veikia nepriklausomai nuo akumuliatoriaus išsikrovimo lygio. Šiuo atveju fotovoltinis modulis veiktų ties 17 V, kai išgaunama didžiausia 75 W galia. Įkroviklyje turi būti naudojamas žeminantysis nuolatinės įtampos keitiklis 17 V įtampą keičiantis į 14 V akumuliatoriui reikalinga krauti įtampą. Šiuo atveju įkrovimo srovę galima apskaičiuoti pagal išraišką:

$$I_{\text{krovimo}} = \frac{U_{\text{modulio}}}{U_{\text{baterijos}}} \times I_{\text{modulio}} \quad (1.2)$$

Įrašę vertes gautume:

$$I_{\text{krovimo}} = \frac{17 \text{ V}}{14 \text{ V}} \times 4,45 \text{ A} = 5,40 \text{ A}.$$

Iš skaičiavimo matyti, kad krovimo srovė padidėja nuo 4,75 A iki 5,40 A. Tai reiškia, kad net 25 % modulio galios būtų neišnaudota. Skaičiuojant neatsižvelgta į valdymo sistemoje patiriamus galios nuostolius. Fotovoltinės jėgainėje sukurtos elektros energijos kiekis priklauso nuo ją valdančio didžiausios galios taško sekimo algoritmo efektyvumo ir valdiklio kokybės. Valdiklio elektroninių įtaisų įtaka energijos praradimui elektrinėse keitiklio grandinėse tiriama ir aprašoma darbuose (Platakis *et al.* 2012 ir Baškys *et al.* 2009).

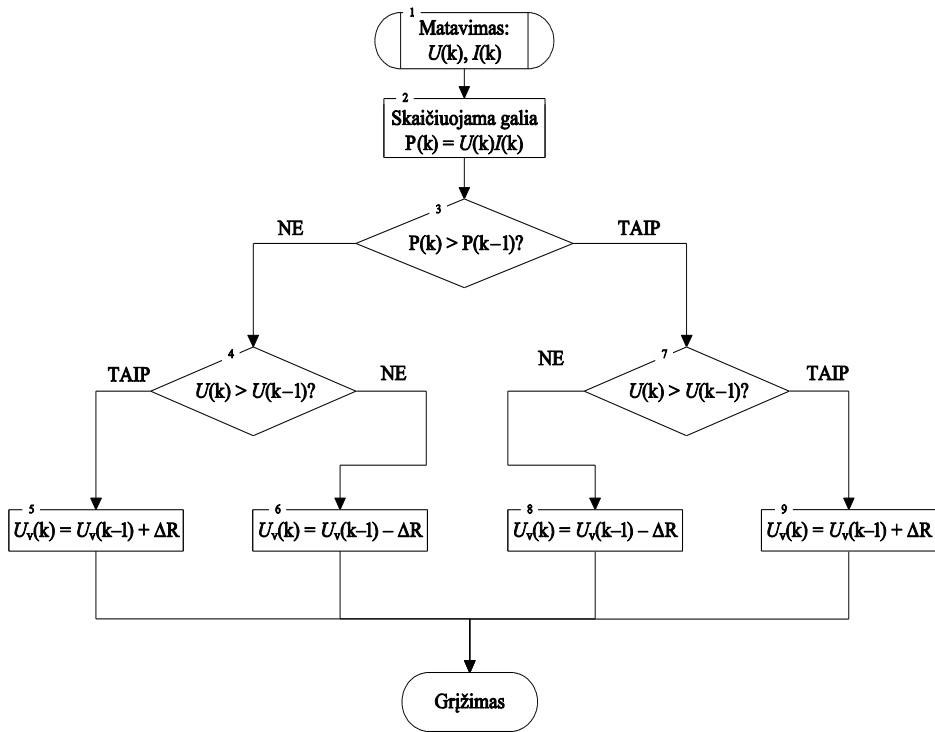


1.7 pav. 75 W fotovoltinio modulio voltamperinė ir galios charakteristikos
Fig. 1.7. Voltage-current and power characteristics of 75 W photovoltaic module

Taigi didžiausios galios tašką galima apibūdinti taip – didžiausios galios taškas yra didžiausios įtampos ir srovės susikirtimas modulio charakteristikoje, generuojant didžiausią modulio galią. Didžiausios galios taškas yra 1.7 paveiksle antruoju numeriu pažymėtos galios charakteristikos smailė.

FV modulio galios charakteristika turi ryškų maksimumą. Dėl šios priežasties nedideli nukrypimai nuo smailės labai sumažina FV modulio galią. Norint kad FV modulis pagamintų didžiausią kiekį elektros energijos, būtina FV modulio darbo režimą labai tiksliai palaikyti didžiausios galios taške. Kadangi fotovoltinių elementų naudingumo koeficientas yra nedidelis, tai yra dar viena priežastis, kodėl ypač svarbu, kad fotovoltinis elementas visada dirbtų didžiausiame savo galios taške.

Valdikliai naudoja skirtingus didžiausios galios taško sekimo algoritmus (Joe *et al.* 2005). Nuo valdymo algoritmo priklauso fotovoltinio modulio didžiausios galios taško aptikimo greitis ir jo sekimo tikslumas (Salas *et al.* 2006). Teigti, kad vienas ar kitas DGT sekimo algoritmas vienareikšmiškai geriausias negalima. Esant skirtingoms FV jėgainės veikimo sąlygoms, gali išryškėti skirtingų algoritmų pranašumai. Vieną mėnesį gali būti efektyvesnis algoritmas, kuris greičiau prisitaiko prie pasikeitusių veikimo sąlygų, o kitą mėnesį kai fotovoltinės jėgainės veikimo charakteristikos greitai nesikeičia, reikalingas tikslesnis algoritmas (Mohamed and Steven, 2014).



1.8 pav. Keitimo ir stebėjimo valdymo algoritmas
Fig. 1.8. Flow chart of Perturb and Observe algorithm

Fotovoltinės jėgainės DGT sekimą apsunkina neprognozuojamai besikeičiančios aplinkos sąlygos ir atskirų fotovoltinių elementų ar modulių itin besiskiriančios darbinės charakteristikos (Anmol and Shyam 2014). Be to, DGT sekimą apsunkina pavieniams fotovoltiniams elementams ar fotovoltiniams moduliams pasikeitusios aplinkos sąlygos, kai dalis fotovoltinės jėgainės dėl išorinių veiksnių patenka į šešėlį, pasidengia sniegu, šerkšnu, dulkėmis ar tiesiog ant atskirų fotovoltinių elementų prilimpa nukritę medžio lapai bei paukščių taršalai. Šie veiksniai yra ypatingi tuo, kad jų negalima numatyti iš anksto atskiriems fotovoltiniams moduliams, taip pat šios sąlygos niekada identišškai neatsikartoja. Dėl šių priežasčių, nėra galimybės iš anksto numatyti apkrovos, kuria turėtų būti apkrauta fotovoltinė jėgainė atskirais laiko intervalais (Hla *et al.* 2014).

Dėl algoritmo paprastumo, didžiausios galios taško sekimui yra plačiai naudojamas keitimo ir stebėjimo algoritmas (angl. *Perturb and Observe – P&O*) (Hussein *et al.* 1995; Ali *et al.* 2012). Įvairiuose šaltiniuose algoritmas atvaizduotas skirtingai (Williams, Shanifa 2014; Ahmed and Almoataz 2014). Apibendrintai pagrindiniai šio algoritmo veiksmi pateikti 1.8 paveiksle. Pirmajame

šio algoritmo etape vykdomi įtampos ir srovės matavimai. Toliau pagal išmatuotas vertes skaičiuojama FV jėgainės galia. Jeigu gauta galia yra didesnė už prieš tai buvusią, valdiklis keičia įtampą žingsniu ΔR ta pačia kryptimi kaip tai darė prieš tai. Jeigu gauta galia yra mažesnė už prieš tai buvusią – valdiklis keičia įtampą priešinga kryptimi (Trishan and Patrick 2007). Pagrindinis šio valdymo algoritmo trūkumas yra tas, jog pasiekęs didžiausią galios tašką, jis nesugeba jame pasilikti (Surya *et al.* 2012), dėl ko visą laiką šokinėja aplink jį – tai padidindamas, tai sumažindamas įtampą.

Vienas iš sprendimų galinčių padidinti šio algoritmo tikslumą priartėjant prie DGT yra sumažinti įtampos keitimo žingsnį. Tokiu būdu yra tiksliau pasiekiamas didžiausios galios taškas, o veikimas tampa stabilesnis. Tačiau sumažinus įtampos keitimo žingsnį iškyla kita problema, kai algoritmas gali nespėti sekti DGT. Tai gali nutikti, kai greitai keičiasi aplinkos sąlygos: gūsiais pučiantis vėjas, debesys, krituliai ir panašūs veiksniai.

Kitas dažnai naudojamas valdymo algoritmas sekti didžiausią galios tašką fotovoltinėje jėgainėje yra didėjančio laidžio algoritmas (angl. *Incremental Conductance – IncCond*). Šis sekimo algoritmas leidžia tiksliai aptikti didžiausią galios tašką. Aptikus šį tašką algoritmas gali jame veikti, kol pasikeis aplinkos sąlygos (Lokanadham and Vijaya 2012). DGT sekimas vyksta skaičiuojant modulio gaminamos galios išvestinę įtampos atžvilgiu:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV}. \quad (1.3)$$

(1.3) išraiškoje esančią išvestinę galima apskaičiuoti remiantis voltamperine charakteristika. Tai leidžia nustatyti apkrovos keitimo kryptį pasirenkant didžiausios galios tašką:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}, & R_l = R_l + \Delta R, \\ \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}, & R_l = R_l - \Delta R, \\ \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}, & R_l = R_m, \end{cases} \quad (1.4)$$

čia ΔR – apkrovos keitimo žingsnis, R_l – fotovoltinės jėgainės apkrovos varža, R_m – charakteringoji modulio varža, kuri randama didžiausios įtampos ir srovės susikirtimo taške.

Tam, kad jėgainė veiktų DGT turi atitikti (1.4) išraiškoje aprašyta trečioji sąlyga. Išsamus algoritmo veiksmų nuoseklumas atskleistas 1.9 paveiksle.

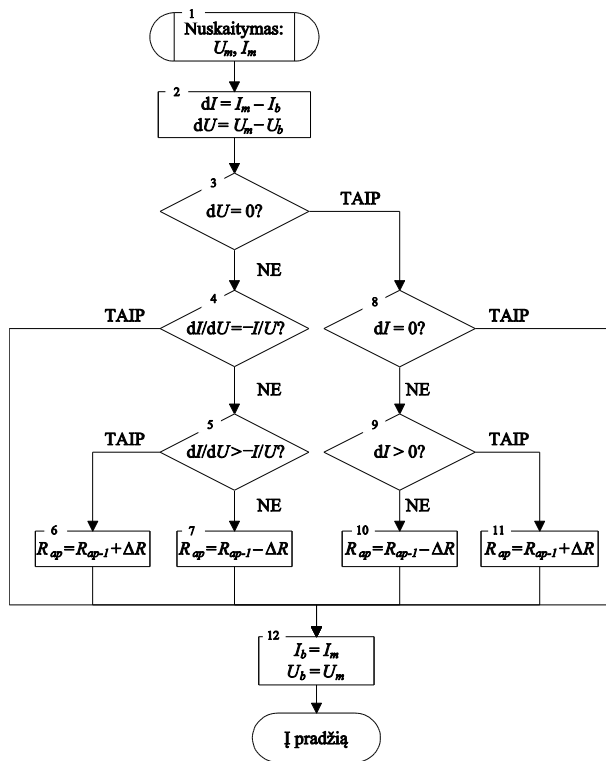
1.9 pav. *IncCond* valdymo algoritmas

Fig. 1.9. Incremental Conductance algorithm

Šio algoritmo pagrindinis privalumas yra tas, kad pasiekęs didžiausią galios tašką, jis sugeba jame veikti. Tačiau ši sąlyga gali būti įgyvendinta tik esant mažam apkrovos keitimo žingsniui. Tai labai svarbu giedrą dieną, kai saulės galios srautas yra didelis. Esant greitai besikeičiančioms sąlygoms taip pat svarbu, kad algoritmas sugebėtų greitai pasiekti naują DGT. Naujas DGT pasiekiamas greičiau, kai apkrovos keitimo žingsnis yra didesnis. Dėl ko algoritmas gali būti arba tikslus arba greitas.

Taip pat yra algoritmų, kurie remiasi tiesioginiu ryšiu tarp saulės galios srauto ir fotovoltinės jėgainės srovės didžiausiame galios taške. Laikantis nuostatų, kad sujungti fotovoltiniai moduliai atitinka gamintojo nurodytas charakteristikas standartinėmis bandymo sąlygomis, piranometro pagalba nustatomas saulės galios srautas tuo metu krentantis į jėgainę ir atitinkamai parenkama srovė didžiausiame galios taške (Pan *et al.* 1999).

Literatūroje (Carvalho *et al.* 2004) yra aprašoma geriausios įtampos fiksavimo algoritmas. Šiam algoritmui įgyvendinti metus laiko yra renkama informa-

cija apie saulės galios srautą bei modulių temperatūrą, tuo pačiu nustatomas didžiausios galios taškas. Aptikus panašias aplinkos sąlygas valdiklis parenka veikimo tašką fotovoltinėje jėgainėje nustatydamas jėgainės išėjime anksčiau užfiksuotą įtampą. Nors valdiklis geba greitai prisitaikyti prie besikeičiančių aplinkos sąlygų, dėl niekada tiksliai neatsikartojančių aplinkos sąlygų didžiausios galios taško sekimas beveik visuomet yra netikslus. Skirtingose geografinėse vietovėse valdikliui reikia daug laiko sukaupti naujus duomenis.

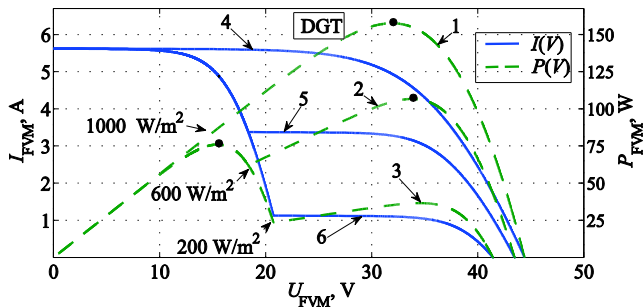
Kitame šaltinyje (Kashif *et al.* 2012) tobulinamas taškų spiečiaus optimizavimo algoritmas. Pagrindinis patobulinto algoritmo privalumas yra tame, kad aptikęs didžiausios galios tašką, beveik panaikina šokinėjimus aplink jį. DGT sekimui taip taikomas slydimo algoritmas, kurį apžvelgoje literatūroje analizuoja (Yoash and Doron 2013) ir (Saravana *et al.* 2014). Kituose šaltiniuose galima rasti įvairių didžiausios galios taško sekimo algoritmų.

Taigi didžiausios galios taško sekimui sukurta daug sudėtingų ir brangiai įgyvendinamų algoritmų. Jų tarpe nėra tobulo algoritmo – kiekvienas algoritmas turi tam tikrų trūkumų. Bendras visų žinomų algoritmų trūkumas tai lėtas ir nepakankamai tikslus didžiausios galios taško sekimas.

1.6. Apėjimo diodų ir šešėlių įtaka fotovoltinei jėgainei

Valdiklio darbą fotovoltinėse jėgainėse apsunkina, fotovoltiniuose moduluose esantys apėjimo diodai. Apėjimo diodai FV modulyje skirti apsaugoti fotovoltinius elementus nuo perkaitimo, kai dalis modulio dirba šešėlyje (Young-Hyok *et al.* 2009). Kita apėjimo diodo paskirtis yra padidinti fotovoltinės jėgainės našumą – esant dalinai apšviestam fotovoltiniam moduliui, apėjimo diodo dėka, modulis gali dirbti apeidamas šešėlyje esančius fotovoltinius elementus ir taip išlaikydamas geresnes energetines charakteristikas (Díaz-Dorado *et al.* 2010). Nesant apėjimo diodo ir daliai modulio patekus į šešėlį, visas modulis dirba mažiau apšviestų elementų darbo režimu (Engin *et al.* 2007.). Dėl šios priežasties fotovoltinės jėgainės našumas labai sumažėja ir dalis saulės energijos lieka nepanaudota.

Apėjimo diodo trūkumai ir privalumai yra matomi 1.10 pav. Čia pavaizduota dviejų fotovoltinių modulių voltamperinės ir galios charakteristikos, kai viename modulyje yra apėjimo diodas, o kitame – nėra. Štrichinė linija atvaizduoja galios charakteristiką. Charakteristikos pateiktos esant skirtingam saulės galios srautui.



1.10 pav. Dviejų fotovoltinių modulių su apėjimo diodais 1–3 galios ir 4–6 voltamperinės charakteristikos

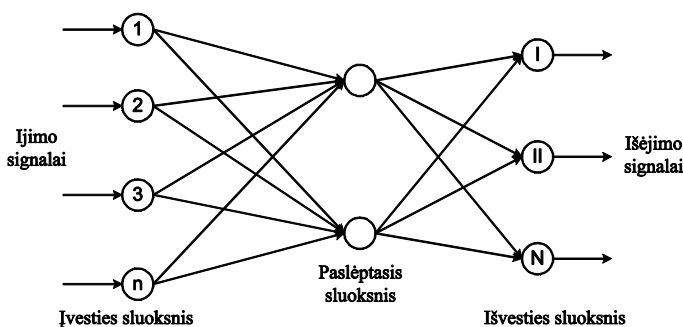
Fig. 1.10. 1-3 current-voltage and 4-6 power characteristic of two solar modules with bypass diodes

Iš galios charakteristikų matyti, kad krintant skirtingiems saulės galios srautams į atskirus fotovoltinius modulius, atsiranda keli lokalūs DGT (Basim *et al.* 2013). Kai apšvietimo lygio skirtumas į atskirus fotovoltinius modulius yra nedidelis, didesnė galia FV jėgainėje gaunama ties dviejų fotovoltinių modulių įtampų suma. Kai saulės galios srautas į antrąjį modulį siekia tik 200 W/m^2 aki-vaizdu, kad FV jėgainė dirba efektyviau tik ties vieno FV modulio išėjimo įtampa. Dirbant fotovoltinei jėgainei charakteristikos darbo taško parinkimą, t. y. darbo įtampą parenka, vykdo DGT sekimo algoritmas (Abdallah *et al.* 2010). Įprasti DGT sekimo algoritmai dažnai nesugeba atskirti globalaus ir lokalaus didžiausios galios taškų. Sekimo algoritmas pasilikęs dirbti lokaliame didžiausios galios taške padaro visos fotovoltinės jėgainės dirbą neefektyviu, kadangi dalis krintančios saulės energijos nepanaudojama. Dalis žinomų sekimo algoritmų patekė į vieną iš lokalių DGT, nesugeba iš jo išeiti ir lieka visam laikui. Tokiu atveju, sistemą tenka perkrauti ir prarasti daug iš saulės energijos nepagamtos elektros energijos.

Taigi iš daugelio fotovoltinių modulių sudarytoje jėgainėje susidaro šešėliai, kurie ženkliai sumažina fotovoltinės jėgainės darbo efektyvumą. Efektyvumui padidinti naudojami apėjimo diodai, kurie išjungia šešėlyje atsiradusius fotovoltinius modulius. Fotovoltinės jėgainės su apėjimo diodais galios charakteristikoje susidaro daug lokalių maksimumo taškų. Išnagrinėtieji didžiausios galios sekimo algoritmai labai lėtai perveda fotovoltinę jėgainę į didžiausios galios režimą ir negarantuoja didelio jėgainės darbo efektyvumo.

1.7. Dirbtinių neuronų tinklų taikymas fotovoltinėje jėgainėje

Dirbtinių neuronų tinklų (DNT) technologija yra sėkmingai taikoma kompleksinių uždavinių sprendimui. Pastaruoju metu dirbtinių neuronų tinklų pritaikumas sparčiai didėja atvaizdų, kalbos, rankraščinio teksto atpažinimo, klasifikavimo, prognozavimo ir pan. srityse (Verikas, Bacauskienė 2003). Dirbtinių neuronų tinklo veikimas remiasi biologinių neuronų veikimu. Norint geriau suprasti kaip veikia dirbtinių neuronų tinklas visų pirma reikia suprasti biologinių neuronų veikimą. Natūralūs neuronai signalus gauna per sinapsės, kurios yra ant neurono dendritų arba membranos. Kai gaunamas signalas yra pakankamai stiprus, neuronas yra aktyvuojamas ir signalas perduodamas per aksoną. Šis signalas gali būti nusiųstas kitai sinapsei ir aktyvuojamas kitas neuronas. Kadangi DNT remiasi žmogaus nervinės sistemos modeliu, kurio pagrindinis elementas yra neuronas, todėl toks modelis geba išspręsti tiksliai neapibrėžiamus uždavinius. Dirbtinių neuronų tinklas – tai dirbtinis procesorių tinklas, kuriuo mėginama modeliuoti žmogaus smegenų nervinių ląstelių struktūrą.



1.11 pav. Dirbtinio neuronų tinklo struktūrinė schema
Fig. 1.11. Structural diagram of artificial neural network

Dirbtinių neuronų tinklo struktūra yra pritaikyta ieškoti netiesiniuose ar kompleksiniuose uždaviniuose tinkamų sprendinių. Plačiausiai naudojamas yra atgalinio ryšio neuronų tinklas (Shamim, *et al.* 2006). Taikant skirtingą dirbtinių neuronų tinklų struktūrą, taip pat galima gauti skirtingus rezultatus. Paprasčiausia dirbtinių neuronų tinklo struktūra, turinti tris procesorių-neuronų sluoksnius yra pavaizduota 1.11 paveiksle. Pagrindiniai dirbtinių neuronų tinklo sluoksniai yra šie: įvesties (angl. *Input Layer*), paslėptasis (angl. *Hidden Layer*) ir išvesties (angl. *Output Layer*).

Apdorojant informaciją daugelis dirbtinių neuronų dirba vienu metu – lygiagrečiai. Pagal Hecht-Nielsen, 1988 m. – dirbtinių neuronų tinklas yra lygiagreti bei paskirstyta informacijos apdorojimo struktūra susidedanti iš apdorojimo elementų (kurie gali turėti lokalią atmintį bei atlikti lokalizuotos informacijos apdorojimą) sujungtų kartu vienakrypčiais signalų kanalais vadinamais sinapsėmis (Larbes *et al.* 2009).

Svarbiausia dirbtinių neuronų tinklų savybė yra sugebėjimas mokytis ir atpažinti mokymuisi skirtus modelius – pavyzdžius. Taikant skirtingus dirbtinių neuronų modelius tinklas gali būti mokomas realiuoju laiku arba tinklą galima apmokyti iš anksto – t. y. prieš pradedant modeliui veikti. Dirbtinių neuronų tinklo mokymui pasirenkamas tam tikras kiekis žinomų pavyzdžių apie modeliuojamos sistemos elgseną praeityje. Tuomet apskaičiuojamas atsiradusios klaidos vektorius dydis ir mokymas vykdomas iš naujo. Mokymas pabaigiamas tuomet, kai klaidos dydis yra mažas arba lygus nuliui (Sayed, *et al.* 2003).

Pastaruoju metu DNT vis labiau yra taikomi saulės energijos gavyboje. Pagrindinės sritys, kuriose eksperimentuojama yra šios:

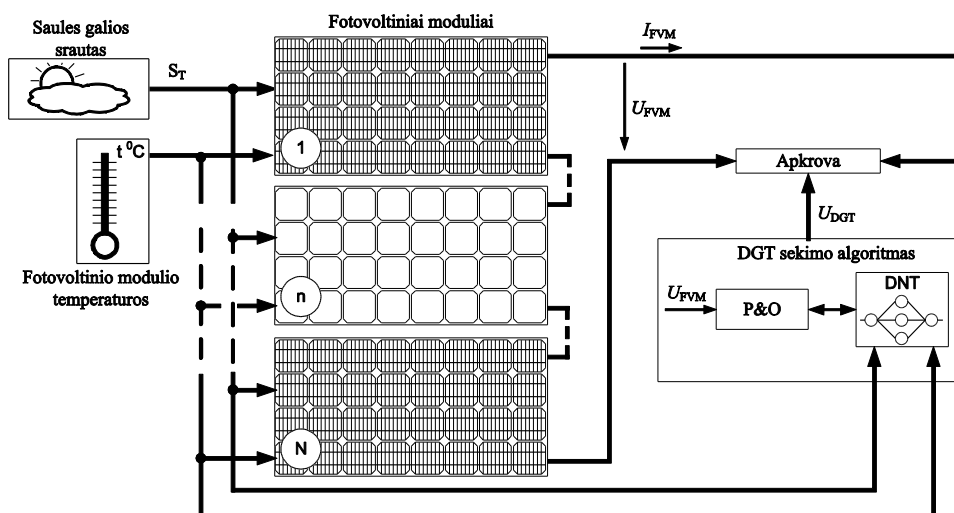
- trumpalaikis išgaunamos saulės energijos prognozavimas (iki 24 valandų);
- ilgalaikis išgaunamos saulės energijos prognozavimas (1 mėnesis ir daugiau);
- pagalba didžiausios galios taško sekimo algoritmams prognozuojant didžiausios galios tašką fotovoltinėje jėgainėje.

Prognozuojant energijos iš fotovoltinių jėgainių atidavimą į skirstomuosius tinklus ir jų apkrovimą, dirbtinių neuronų tinklas pradeda efektyviai veikti tik po labai ilgo apmokymo, kuris gali trukti 4 metus ar net ilgiau.

Kai dirbtinių neuronų tinklas yra taikomas didžiausios galios taško sekimui, tinklas yra apmokomas eksperimentiškai gauta didžiausios galios priklausomybe nuo saulės galios srauto. Apmokytas DNT gali numatyti apytikrę didžiausios galios taško padėtį (Hatti *et al.* 2010). Yra šaltinių (Chaouachi, *et al.* 2009), kuriuose aprašoma bandymai taikyti dirbtinių neuronų tinklą trumpalaikiam saulės galios srauto prognozavimui, skirtam aptikti didžiausios galios tašką jėgainėje. Tačiau šis metodas, kaip ir pirmieji du metodai skirti energijos prognozavimui, reikalauja labai ilgo apmokymo laiko, todėl jie netinkami disertacijoje suformuluotų uždavinių sprendimui.

Fotovoltinės jėgainės didžiausios galios taško nuspėjimas dirbtiniu neuronų tinklu ilgai trunka ir yra netikslus. Todėl jis naudojamas kaip pagalbinė priemonė standartinių DGT sekimo algoritmų veiklos paspartinimui. Struktūrinė tokio valdymo įtaiso schema pateikta 1.12 paveiksle. Kadangi galia fotovoltinio modulio išėjime nuo saulės galios srauto ir fotovoltinio modulio temperatūros, todėl dirbtinių neuronų tinklas turi du įėjimus, skirtus šiems poveikio signalams priimti. Žinant saulės galios srauto ir fotovoltinio modulio temperatūros vertes ap-

skaičiuojama didžiausia fotovoltinio modulio galia. Kadangi neapsimokęs dirbtinių neuronų tinklas yra netikslus, todėl pagrindinis didžiausios galios taško sekimas vykdomas naudojant P&O algoritmą. P&O algoritmas naudojamas išmatuotas fotovoltinio modulio įtampos ir srovės vertes apskaičiuoja didžiausios galios taško padėtį voltamperinėje charakteristikoje. Atitinkamai keitiklio pagalba valdomas optimalus galios atidavimas esamai apkrovai. Esant lėtai besikeičiančiam saulės galios srautui didžiausios galios taško sekimas vykdomas su P&O algoritmu. Tuomet, kai aplinkos sąlygos pasikeičia greitai, didžiausios galios taško sekimas vykdomas dirbtinių neuronų tinklu.



1.12 pav. Fotovoltinio modulio valdymo įtaiso taikant dirbtinių neuronų tinklą schema

Fig. 1.12. Structural diagram of using the artificial neural network in photovoltaic module control device

Siekiant padidinti didžiausios galios taško sekimo tikslumą, dirbtinių neuronų tinklas yra mokomos P&O algoritmo veikimo metu. Tiksliam DNT apmokymui naudojama didesnė duomenų saugojimui skirta valdiklio atmintinė. Tai padidina valdiklio kainą. Viena iš kainos sumažinimo būdų yra duomenų saugojimas ne vidinėje atmintinėje, jŲ o siuntimas į internetinius serverius (Yasushi, *et al.* 2010).

1.8. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Apžvelgus fotovoltinių jėgainių plėtros tendencijas, išanalizavus fotovoltinio elemento ir modulio veikimą, jo savybes, aplinkos temperatūros įtaką fotovoltiniam moduliui, palyginus įvairių tipų fotovoltinių modulių charakteristikas, išanalizavus fotovoltinės jėgainės darbo metu susidariusių šešėlių įtaką fotovoltinės jėgainės darbui ir dirbtinių neuronų tinklų pritaikomumą fotovoltinės jėgainės valdymo elektroninėje sistemoje galima padaryti tokias išvadas:

1. Fotovoltinės energetikos plėtrą dotuoja valstybės padidindamos pagamintos elektros energijos supirkimo kainą, kuri laikui bėgant mažinama. Norint palaikyti fotovoltinės energetikos rentabilumą, fotovoltinių jėgainių plėtotojai ieško būdų jėgainės efektyvumui padidinti. Vienas iš galimų efektyvumo didinimo būdų yra maksimalią saulės energijos srauto dalį paversti elektros energija.
2. Saulės energijos paverčiamos elektros energija kiekis labai priklauso nuo fotovoltinių elementų tipo. Brangiausi, tačiau efektyviausiai gebantys paversti saulės energiją elektros energija yra monokristaliniai bei dvipusiai (angl. *bifacial*) fotovoltiniai elementai. Šiuo metu plačiai taikomų polikristalinių fotovoltinių elementų naudingumo koeficientas neviršija 22 %.
3. Tiriant fotovoltines jėgaines, analizuojant jų darbo efektyvumą, būtina turėti fotovoltinės jėgainės imitacinį modelį įvertinantį jėgainės struktūrą, veikimo principus ir įgalinantį imituoti įvairias aplinkos sąlygas pasirinktoje pasaulio vietovėje. Šiuo metu literatūroje aprašytų modelių su tokiomis galimybėmis nėra.
4. Sudarant matematinius fotovoltinių jėgainių modelius, būtina atsižvelgti į jas sudarančių modulių elektrines savybes, kurios priklauso nuo modulio dydžio, naudojamų fotovoltinių elementų, jų gamybos technologijos bei kitų veiksnių. Pasirinkus konkretų FV modulį galima tiksliai sudaryti matematinį modelį ir juo pasirėmus atlikti detalius realių FV modulių tyrimus praktiškai be klaidų.
5. Fotovoltinio modulio galios charakteristika turi maksimumą. Dėl šios priežasties nedideli nukrypimai nuo smailės labai sumažina fotovoltinio modulio galią. Norint kad fotovoltinis modulis pagamintų didžiausią kiekį elektros energijos, būtina modulio darbo režimą labai tiksliai nuolat palaikyti didžiausios galios taške.
6. Didžiausios galios taško sekimui sukurta daug sudėtingų ir brangiai įgyvendinamų algoritmų. Jų tarpe nėra tobulo algoritmo – kiekvienas algoritmas turi tam tikrų trūkumų. Bendras visų žinomų algoritmų trūkumas tai lėtas ir nepakankamai tikslus didžiausios galios taško seki-

mas, todėl ne visa saulės energija paverčiama elektros energija. Dėl netobulai veikiančio valdiklio fotovoltinė jėgainė veikia neefektyviai.

7. Iš daugelio fotovoltinių modulių sudarytoje jėgainėje susidaro šešėliai, kurie ženkliai sumažina fotovoltinės jėgainės darbo efektyvumą. Efektyvumui padidinti naudojami apėjimo diodai, kurie išjungia šešėlyje atsiradusius fotovoltinius modulius. Fotovoltinės jėgainės su apėjimo diodais galios charakteristikoje susidaro daug lokalių maksimumo taškų. Išnagrinėtieji didžiausios galios sekimo algoritmai labai lėtai perveda fotovoltinę jėgainę į globalų maksimumą atitinkantį didžiausios galios režimą ir negarantuoja didelio jėgainės darbo efektyvumo.

Iš padarytų išvadų išplaukia tezė – fotovoltinės energetikos sėkmingai plėtrai reikia analizuoti ir spręsti fotovoltinės jėgainės efektyvaus valdymo mokslinę problemą.

Problemos sprendimo metu būtina patikrinti tokias mokslines hipotezes:

- sekant didžiausios galios tašką fotovoltinėse jėgainėse intelektualiujų metodų taikymas leidžia sparčiai ir tiksliai aptikti didžiausios galios tašką;
- įgyvendintas intelektualus didžiausios galios taško sekimo metodas leidžia padidinti fotovoltinės jėgainės efektyvumą (našumą) nekeičiant jėgainės fotovoltinių modulių ir nedidinant jų kiekio.

Taigi tyrimų objektu tikslinga pasirinkti – fotovoltinių jėgainių valdymo algoritmus ir jų adaptavimą darbui bet kokioms klimatinėms sąlygoms bei fotovoltinių jėgainių apkrovos keitimo būdus sekant didžiausios galios tašką.

Šiuo metu aktualių tyrimų tikslą tikslinga formuluoti taip – sukurti ir ištirti didžiausios galios taško sekimo metodiką, leidžiančią padidinti fotovoltinės jėgainės našumą esant greitai besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis ir patobulinti fotovoltinės jėgainės valdymo būdą.

Tikslui pasiekti turi būti išspręsti tokie uždaviniai:

1. Sukurti modelius ir ištirti fotovoltinės jėgainės, veikiančios su didžiausią galią sekančiu valdikliu, našumą.
2. Pasiūlyti metodiką leidžiančią padidinti fotovoltinės jėgainės taikomo didžiausios galios taško sekimo algoritmo efektyvumą.
3. Ištirti aplinkos sąlygų kitimo įtaką fotovoltinės jėgainės našumui.
4. Pasiūlyti efektyvų fotovoltinės jėgainės apkrovos keitimo būdą.

Fotovoltinės jėgainės matematinį modelių sudarymas

Tyrimų tikslas – sudaryti bendrą fotovoltinės jėgainės matematinį modelį leidžiantį tirti įvairios galios fotovoltines jėgaines, imituojant įvairias jėgainių veikimo sąlygas, susidarancias keičiantis saulės galios srautui, modulio temperatūrai, bei naudojant skirtingus didžiausios galios taško sekimo algoritmus.

Skyriuje sudaromas matematinis fotovoltinės jėgainės modelis įgyvendinamas *Matlab*[®]/*Simulink*[®] terpėje. Detalesniems tyrimams fotovoltinės jėgainės struktūra modelyje įgyvendinama išskaidyta į atskirus struktūrinius elementus, kurių visuma sudaro galimybę tirti fotovoltinių jėgainių veikimą esant nenuspėjamai besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis ir naudojant skirtingus vienas kitą papildančius didžiausios galios taško sekimo algoritmus.

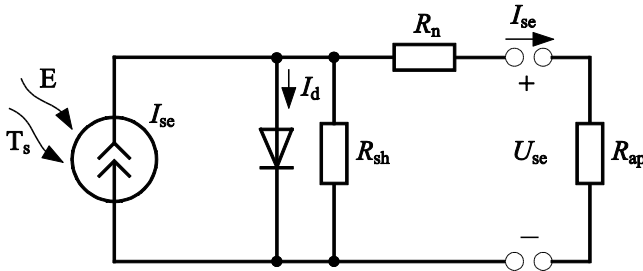
Fotovoltinės jėgainės darbo metu kinta fotovoltinių modulių temperatūra. Temperatūros prognozavimui ir jos kitimo imitavimui sudaromas matematinis temperatūros kitimo modelis ir jis įterpiamas į fotovoltinės jėgainės modelį atskiru funkcinio bloku.

Fotovoltinės jėgainės valdymo algoritmo tyrimui sudaromas daugelyje valdiklių naudojamas standartinio *Incremental Conductance* didžiausios galios taško sekimo algoritmo modelis. Šio algoritmo trūkumams pašalinti ir jėgainės našumui padidinti naudojamas dirbtinių neuronų tinkas. Skyrius pabaigiamas apibendrinimu ir matematinių modelių sudarymo metu padarytomis išvadomis.

Skyriaus tematika paskelbti 6 darbai (Vasarevičius, Martavičius, Pikutis. 2012, Vasarevičius, Pikutis 2012, Pikutis, Vasarevičius, Martavičius. 2014, Pikutis 2014, pikutis 2015, Pikutis, Vasarevičius, Martavičius 2015).

2.1. Pavienio fotovoltinio modulio matematinio modelio sudarymas

FV jėgainės modelio sudarymui būtinas pavienio FV elemento modelis, kuris imituotų realų fotovoltinį elementą ir kurio charakteristikos būtų artimos realių fotovoltinių elementų charakteristikoms. Galimi įvairūs būdai fotovoltinio elemento matematiniam modeliui sudaryti (Adel 2010; SenthilMurugan *et al.* 2010). Išanalizavus literatūrą, galima teigti, kad dažniausiai matematinis modelis apibūdina fotovoltinio elemento įtampos ir srovės priklausomybes – voltamperines charakteristikas. 2.1 paveiksle pavaizduota fotovoltinio elemento tipinė ekvivalentinė schema. Šioje schemoje idealų FV elementą vaizduoja lygiagrečiai sujungti idealūs srovės šaltinis ir diodas. Lygiagrečiai srovės šaltiniui įjungtas diodas apibūdina atvirkštinę įsisotinimo srovę I_d . Nuostolius FV elemente įvertina ekvivalentinėje schemoje esančios R_n ir R_{sh} varžos (Sridhar *et al.* 2010).



2.1 pav. Fotovoltinio elemento tipinė ekvivalentinė schema

Fig. 2.1. Equivalent diagram of photovoltaic cell

FV modulio sukuriama srovė I_{FVM} matematinė išraiška yra užrašoma taip (Huan-Liang *et al.* 2008):

$$I_{FVM} = I_{tj} \left[1 - K_1 \left(\exp(K_2 U_{FVM}^m) - 1 \right) \right], \quad (2.1)$$

čia I_{tj} – fotovoltinio modulio trumpojo jungimo srovė; U_{FVM} – įtampa FV modulio išėjime.

Koeficientai K_1 , K_2 , ir m apskaičiuojami taip:

$$K_1 = 0,01175, \quad (2.2)$$

$$K_2 = \frac{K_4}{U_{aj}^m}, \quad (2.3)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{(I_{tj}(1+K_1) - I_{DGT})}{K_1 I_{tj}} \right], \quad (2.4)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{(1+K_1)}{K_1} \right], \quad (2.5)$$

$$m = \frac{\ln \frac{K_3}{K_4}}{\ln \frac{U_{DGT}}{U_{aj}}}, \quad (2.6)$$

čia: U_{aj} – fotovoltinio modulio tuščiosios veikos įtampa; I_{DGT} – fotovoltinio modulio srovė didžiausios galios taške; U_{DGT} – fotovoltinio modulio įtampa didžiausios galios taške.

Remiantis (2.1) išraiška gaunama tipinė fotovoltinio elemento voltamperinė charakteristika nepriklausanti nei nuo saulės galios srauto, krintančio į modulį, nei nuo aplinkos temperatūros T_{apl} . Norint gauti fotovoltinio modulio modelį, kurį įtakoja saulės galios srauto ir temperatūros kitimas, (2.1) išraiška papildoma kintamaisiais įvertinančiais aplinkos sąlygų pokyčius lyginant su standartinėmis bandymo sąlygomis atitinkamai lygiais $E_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ ir $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Lygtys įvertinančios FV modulio srovės ir įtampos pokyčius dėl aplinkos temperatūros pokyčio yra tokios:

$$\Delta T_{apl} = T_{apl} - T_0, \quad (2.7)$$

$$\Delta I_{se} = \alpha_{tj} \left(\frac{E}{E_0} \right) \Delta T_{apl} + \left(\left(\frac{E}{E_0} \right) - 1 \right) I_{tjSBS}, \quad (2.8)$$

$$\Delta U_{se} = -\beta_{aj} \Delta T_{apl} - R_n \Delta I_{se}, \quad (2.9)$$

čia: ΔT_{apl} – aplinkos temperatūros T_{apl} nuokrypis lyginant su standartinių bandymų temperatūra T_0 ; α_{tj} – temperatūrinis trumpojo jungimo srovės koeficientas; β_{aj} – temperatūrinis tuščiosios veikos įtampos koeficientas; R_n – nuosek-

lioji fotovoltinio modulio varža; E – momentinis saulės galios srautas patenkantis į fotovoltinio modulio paviršių; E_0 – saulės galios srautas esant standartinėms bandymo sąlygoms $E_0=1000 \text{ W/m}^2$; ΔI_{se} – srovės nuokrypis fotovoltinio elemento išėjime, susidaręs dėl aplinkos temperatūros pokyčio; ΔU_{se} – įtampos nuokrypis fotovoltinio elemento išėjime, susidaręs dėl aplinkos temperatūros pokyčio; I_{tj_SBS} – trumpojo jungimo srovė standartinėmis bandymo sąlygomis $E_0=1000 \text{ W/m}^2$ ir $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Įtampa ir srovė modulio išėjime, kai kinta saulės galios srautas ir FV modulio temperatūra, randamos iš šių lygčių:

$$U_{se_n} = U_{se} + \Delta U_{se}, \quad (2.10)$$

$$I_{se_n} = I_{se} + \Delta I_{se}, \quad (2.11)$$

čia I_{se_e} – fotovoltinio elemento generuojama srovė kintant saulės galios srautui; U_{se_e} – įtampa fotovoltinio elemento išėjime kintant saulės galios srautui; I_{se} – fotovoltinio elemento generuojama srovė; U_{se} – įtampa fotovoltinio elemento išėjime.

Skaiciavimams reikalingi duomenys randami kiekviename gamintojo pateiktame fotovoltinio modulio aprašyme. Fotovoltinio modulio įtampa apskaičiuojama naudojant Omo dėsnį:

$$U_{se} = R_{ap} I_{se}, \quad (2.12)$$

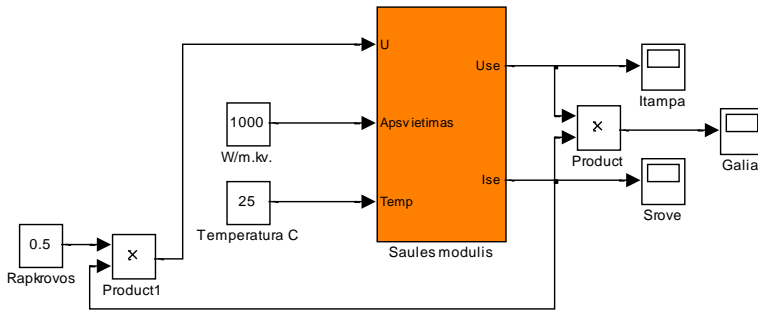
čia R_{ap} – modulio apkrovos varža.

Taigi, sprendžiant pateiktas lygtis ir sudarant matematinį fotovoltinio modulio modelį, reikalinga išsami fotovoltinio modulio specifikacija. Dažniausiai FV modulio gamintojai pateikia šiuos parametrus, nustatytus standartinio bandymo metu:

- FV modulio galia P_p ;
- srovė didžiausiame galios taške I_{DGT} ;
- įtampa didžiausiame galios taške U_{DGT} ;
- trumpojo jungimo srovė I_{tj} ;
- tuščiosios veikos įtampa U_{aj} ;
- temperatūrinis trumpojo jungimo srovės koeficientas α_{tj} ;
- temperatūrinis tuščiosios veikos įtampos koeficientas β_{aj} .

Sudarytas matematinis modelis *Matlab*[®]/*Simulink*[®] terpėje pateiktas 2.2 paveiksle. Modelis sudarytas taip, kad jį būtų galima nesudėtingai prijungti prie papildomų įtaisų skirtų aplinkos poveikio įtakos fotovoltinio modulio charakteristikoms tirti. *Matlab*[®]/*Simulink*[®] terpėje sukurtas blokas turi įėjimą *Apšvieti-*

mas – skirtą prijungti saulės galios srauto kitimo bloką, įėjimą *Temp* – skirtą prijungti modulio temperatūros kitimo bloką ir įėjimą *U* – įtampos nepriklausančios nuo aplinkos veiksnį įėjimą. Sudarytojo modelio išėjime gaunama apskaičiuota momentinė įtampa ir srovė.



2.2 pav. Fotovoltinio modulio modelio sukurto *Matlab*[®]/*Simulink*[®] terpėje blokinė schema

Fig. 2.2. Block diagram of photovoltaic module implemented in *Matlab*[®]/*Simulink*[®]

Matlab[®]/*Simulink*[®] terpėje sudarytas fotovoltinio modulio modelis remiantis 2.1 lentelėje pateiktais modulio parametrais.

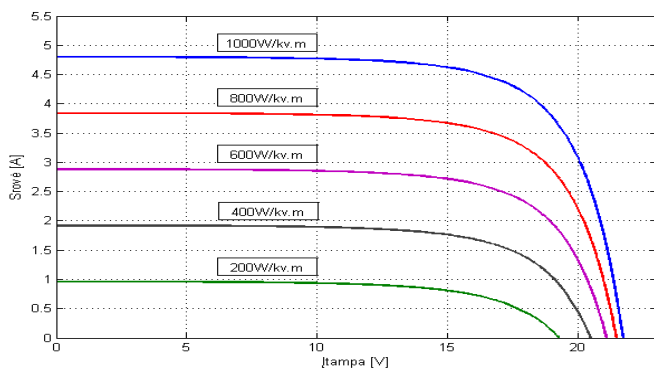
2.1 lentelė. 75 W fotovoltinio modulio parametrai

Table 2.1. Electrical data of PV module

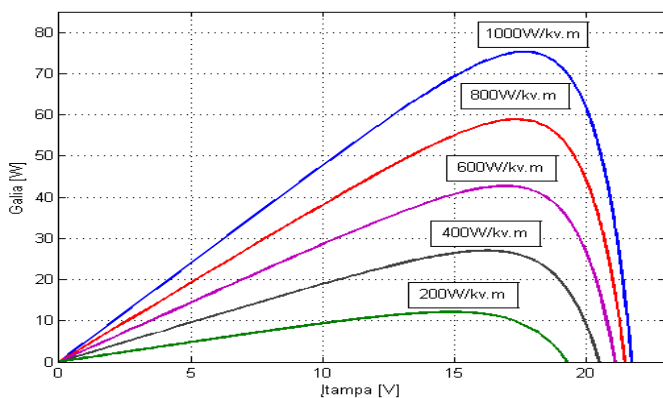
| Parametras | Vertė |
|---|-------|
| Modulio galia P_p , W | 75 |
| Didžiausios galios srovė I_{DGT} , A | 4,4 |
| Didžiausios galios įtampa U_{DGT} , V | 17,0 |
| Trumpo jungimo srovė I_{tr} , A | 4,8 |
| Tuščios veikos įtampa U_{aj} , V | 21,7 |
| Temperatūrinis trumpojo jungimo srovės koeficientas α_{tr} , mA/°C | 2,06 |
| Temperatūrinis tuščios veikos įtampos koeficientas β_{aj} , mV/°C | -77 |

Sudarytame modelyje imituojant apkrovos varžos kitimą 0,5 Ω žingsniu, apskaičiuota FV modulio voltamperinė charakteristika pateikta 2.3 paveiksle a. Iš šios charakteristikos analizės išplaukia, kad ši charakteristika atitinka 2.1 lentelėje pateiktus parametrus. Akivaizdžiai matyti trumpojo jungimo srovės ir tuščios veikos įtampos vertės yra vienodumas. Papildomam modelio tikslumo įvertinimui būtina nustatyti didžiausią galią. Šiam tikslui, sudauginus momentines

srovės ir įtampos vertės, apskaičiuojam elektros galia modulio išėjime. FV modulio galios charakteristika pateikta 2.3 paveiksle b.



a)



b)

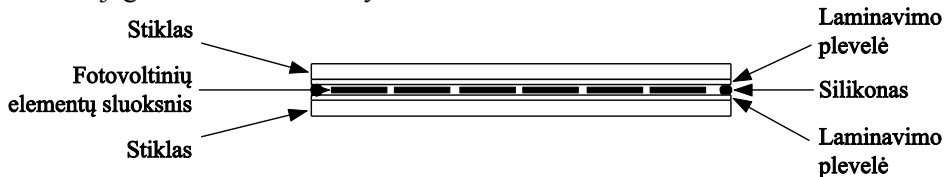
2.3 pav. Fotovoltinio modulio imitacinės voltamperinė (a) ir galios (b) charakteristikos esant 25 °C temperatūrai

Fig. 2.3. Current–voltage a) and power–voltage b) curves of photovoltaic module when the temperature is 25 °C

Atlikus pirminę modelio patikrą galima teigti, kad modelis apibūdina realaus fotovoltinio modulio charakteringąsias savybes. Keičiant sudarytame modelyje 2.1 lentelėje pateiktų parametrų vertes į naujai pasirinkto fotovoltinio modulio parametrus, modelį galima taikyti ir didesnės galios modulių bei fotovoltinių jėginių darbo imitavimui.

2.2. Modulio temperatūros kitimą įvertinantis matematinis modelis

Siekiant matematiniam modelyje įgyvendinti fotovoltinės jėgainės struktūrinę schemą ir ištirti temperatūros įtaką fotovoltinės jėgainės veikimui, būtina sudaryti atskirą FV modulio temperatūros kitimo modelį. Šis modelis reikalingas imituoti gamtoje vykstančius temperatūros pokyčius. Kadangi aplinkos temperatūra šviesiuoju paros metu skiriasi nuo veikiančio fotovoltinio modulio temperatūros (Armstrong *et al.* 2010), sudaromas matematinis modelis imituojantis fotovoltinio modulio temperatūros kitimą besikeičiančiomis aplinkos sąlygomis. Žinoma, kad FV modulio temperatūra gali pakilti iki 70 °C (Malik *et al.* 2010), o kai kuriuose pasaulio regionuose gali pasiekti didesnes reikšmes (Saurabh 2013). Tik žinant FV modulio temperatūros kitimą galima tiksliai ištirti jos įtaką fotovoltinės jėgainės darbui ir valdymui.



2.4 pav. Fotovoltinio modulio struktūra
Fig. 2.4. Structure of photovoltaic module

Siekiant padidinti fotovoltinių modulių galią prailginti jų darbo trukmę, ieškoma naujų technologinių sprendimų modulių konstrukcijoje ir jų gamyboje. Šiuolaikinių fotovoltinių modulių gamybos technologija jau leidžia išsaugoti iki 85 % naujo modulio charakteristikų pradinių verčių net po dvidešimties metų darbo esant įvairiomis aplinkos sąlygomis, kai temperatūros svyravimai gali siekti nuo -50 °C iki +80 °C. Tokio fotovoltinio modulio struktūra pateikta 2.4 paveiksle. Jį sudaro penki pagrindiniai sluoksniai: priekinis stiklas, priekinė laminavimo plėvelė, fotovoltinių elementų sluoksnis, galinė laminavimo plėvelė ir galinis stiklas. Kadangi stiklo ir laminavimo plėvelės optinės ir šiluminės savybės yra beveik identiškos, o laminavimo plėvės labai plonos, todėl skaičiavimų metu pakanka atsižvelgti tik į priekinio ir galinio stiklų bei fotovoltinių elementų sluoksnio savybes (Giuseppe *et al.* 2010).

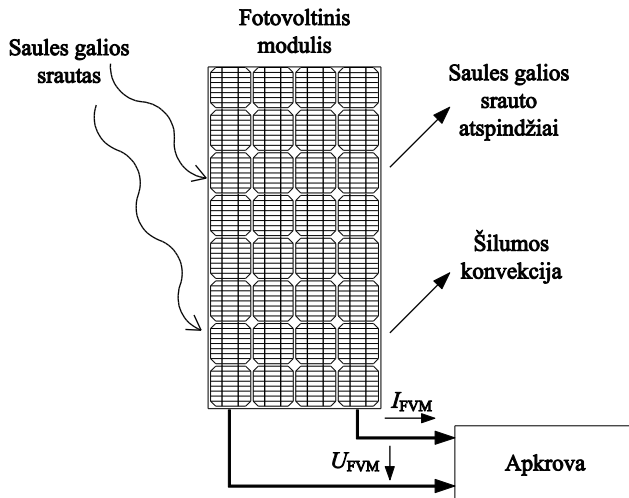
Fotovoltinio modulio temperatūrą įtakoja daug veiksnių: saulės spinduliuotės intensyvumas, aplinkos temperatūra, vėjo greitis ir kryptis (Schwingshackl *et al.* 2013), medžiagų, iš kurių pagamintas FV modulis, savybės (Hunter *et al.* 2006) ir modulio tvirtinimo būdas (Laura *et al.* 2014). Vertinant fotovoltinio modulio darbo efektyvumą laikoma, kad temperatūros svyravimai yra nuosekliai kintantys. Kintant saulės galios srautui modulio temperatūra pasikeičia su tam

tikra inercija, t. y., didėjant saulės galios srautui modulio temperatūra pradeda kilti tik po tam tikro laikotarpio. Atitinkamai procesas kartojasi, kai saulės galios srautas sumažėja – modulis pradeda vėsti tik praėjus tam tikram laikotarpiui.

Šilumos mainus įtakoja trys pagrindiniai veiksniai: laidumas, konvekcija ir spinduliavimas. 2.5 paveiksle. pateikti pagrindiniai šilumos perdavimo būdai fotovoltiniame modulyje jo veikimo metu. Šilumos konvekcija ir spinduliavimas nuo modulio priekinės ir galinės pusių yra stipriai susiję, o šilumos perdavimas tarp modulio rėmo ir pastato ar kitos konstrukcijos yra labai nedidelis. Fotovoltinio modulio šiluminė talpa apibūdinama tokia formule:

$$C_{\text{mod}} \frac{dT_{\text{mod}}}{dt} = P_{\text{tb}} + P_{\text{ib}} - P_{\text{konv}} - P_{\text{is}}, \quad (2.13)$$

čia C_{mod} – modulio šiluminė talpa; dT_{mod} / dt – modulio temperatūros išvestinė laike; P_{tb} – saulės galios sraute esančių trumpųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje; P_{ib} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje; P_{konv} – šilumos konvekcijos kitimo greitis fotovoltiniame modulyje; P_{is} – modulyje sukuriama elektros momentinė galia jo išėjime.



2.5 pav. Temperatūros sklaidos schema fotovoltiniame modulyje
Fig. 2.5. Structural diagram of heat exchanging in photovoltaic module

Fotovoltinio modulio temperatūros kitimą pagal (2.13) formulę galima apskaičiuoti žinant šviesos trumpųjų ir ilgųjų bangų spinduliuotės kiekio, konvekcijos pasikeitimo ir sukuriama elektros galios priklausomybes nuo fotovoltinio modulio darbo charakteristikų, esant besikeičiančioms aplinkos sąlygoms. Ana-

lizuojant šilumos įtaką fotovoltinio modulio paviršiaus temperatūrai priimama, kad fotovoltinį modulį sudaro trys pagrindiniai sluoksniai: stiklas, laminavimo plėvelė ir fotovoltinių elementų sluoksnis, ir kad visų trijų sluoksnių temperatūra yra vienoda. Sandarinimo medžiagos ir rėmas dengia labai nedidelę fotovoltinio modulio paviršiaus dalį ir beveik neįtakoja FV modulio temperatūrą. Todėl apskaičiuojant modulio temperatūros kitimą į jų poveikį neatsižvelgiama. Fotovoltinio modulio šiluminė talpa yra nusakoma pavienių elementų šiluminių talpų, iš kurių sudarytas FV modulis, suma:

$$C_{\text{mod}} = \sum_m S_p \cdot l_m \cdot \rho_m \cdot C_m, \quad (2.14)$$

čia S_p – fotovoltinio modulio paviršiaus plotas; l_m – medžiagos storis fotovoltiniame modulyje; ρ_m – medžiagos tankis; C_m – medžiagos savitoji šiluminė talpa; $m = 1, 2, 3$ – fotovoltinio modulio konstrukcijos elemento eilės numeris.

Tiesioginiai saulės spinduliai pasiekiantys priekinę fotovoltinio modulio pusę priklauso nuo to, kiek saulės spinduliuotės trumpųjų bangų srauto atspindėjo ir kiek jų pateko ant fotovoltinio elemento paviršiaus. Šviesos trumpųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje apskaičiuojama:

$$P_{\text{tb}} = \alpha \cdot E_{\Sigma} \cdot S_p, \quad (2.15)$$

čia α – santykinis fotovoltinio modulio naudingo darbo paviršiaus sugeriančio saulės galios srautą koeficientas; E_{Σ} – visas saulės galios srautas patenkantis į fotovoltinio modulio paviršių.

Šilumos sugertis priklauso nuo fotovoltinių modulių krypties ir kampo saulės atžvilgiu, viso fotovoltinių modulių tinklo išdėstymo, nuo fotovoltinio modulio laminavimo medžiagų sugėrimo ir atspindėjimo savybių, stiklo ir fotovoltinių elementų sugėrimo savybių. Per silikoną sugerama apie 77 % saulės galios srauto fotonų krentančių į fotovoltinio elemento paviršių. Fotovoltiniai moduliai, kurių priekinis stiklas yra padengtas atspindį mažinančia danga, fotonų atsispindėjimą gali sumažinti iki 10 %. 10 % sumažėjęs atsispindėjimas fotonų sugėrimą padidina 0,7 karto. Nors sugertų fotonų kiekį patekusių į fotovoltinio modulio paviršių yra lengviausia apskaičiuoti vidurdiu, kai saulės galios srautas beveik nekinta, tačiau iš praktikos yra žinoma, kad fotonų sugertis priklauso nuo saulės padėties ir gali sumažėti 20–30 % esant nedideliame saulės galios srautui (Jones *et al.* 2001).

Saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje, kai jo temperatūra T , aprašoma Stefano ir Boltcmano dėsnio (angl. *Stefan–Boltzmann law*):

$$P_{\text{ib}} = \sigma \cdot E \cdot T^4, \quad (2.16)$$

čia σ – Stefano ir Bolcmano konstanta $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$; E – spinduliuojamas saulės galios srautas.

Reiškiny, kai dalis saulės galios srauto fotonų atsispindėję nuo paviršiaus pasiekia kitą paviršių, vadinamas sklaidos faktoriumi (angl. *view factor*). Saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų spinduliuotės mainai tarp skirtingų x ir y paviršių apibūdinami tokia formule:

$$P_{ib_{xy}} = S_x (L_x - L_y) F_{xy} = S_y (L_y - L_x) F_{yx}, \quad (2.17)$$

čia $P_{ib_{xy}}$ – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų mainų srautų tarp x ir y paviršių galia; S_x, S_y – x ir y paviršių plotai; L_x – nuo x paviršiaus atsispindėjęs saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galios srautas; L_y – nuo y paviršiaus atsispindėjęs saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galios srautas; F_{xy}, F_{yx} – sklaidos koeficientai, apibūdinantys saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų srauto perdavimą iš x paviršiaus į y paviršių ir atvirkščiai.

Laikoma, kad modulio galinės pusės temperatūra yra tokia pati arba artima medžiagos paviršiui, ant kurio įrengta fotovoltinė jėgainė, pvz., pastato stogo, todėl ilgųjų bangų atspindėjimas nuo galinės modulio pusės į kitus paviršius yra labai mažas ir nedaro reikšmingos įtakos skaičiavimams. Saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų spinduliuotės mainų skaičiavimai yra reikalingi tik skaičiuojant ilgųjų bangų atspindžius nuo priekinės modulio paviršiaus pusės. Jeigu fotovoltinis modulis yra sumontuotas kampu β_{pav} zenito atžvilgiu, tuomet jo sklaidos koeficientas dangaus skliauto požiūriu lygus $F_{xy} = (1 + \cos\beta_{\text{pav}}) / 2$, o žemės paviršiaus požiūriu toks $F_{yx} = (1 - \cos\beta_{\text{pav}}) / 2$.

Įvertinus (2.16) formulėje saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų mainų srautus tarp fotovoltinio modulio ir dangaus skliauto bei žemės paviršiaus, saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų galia fotovoltinio modulio paviršiuje išreiškiama tokia lygtimi:

$$P_{ib} = \sigma \left(\frac{1 + \cos\beta_{\text{pav}}}{2} E_{\text{dan}} \cdot T_{\text{dan}}^4 + \frac{1 - \cos\beta_{\text{pav}}}{2} E_{\text{zem}} \cdot T_{\text{zem}}^4 - E_{\text{mod}} \cdot T_{\text{mod}}^4 \right) S_p, \quad (2.18)$$

čia: β_{pav} – fotovoltinio modulio pasvirimo kampas; E_{dan} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atspindėjusių nuo dangaus skliauto galios srautas; E_{zem} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atspindėjusių nuo žemės paviršiaus galios srautas; E_{mod} – saulės galios sraute esančių ilgųjų bangų atspindėjusių nuo FV modulio paviršiaus galios srautas; T_{dan} – dangaus skliauto temperatūra; T_{zem} – žemės paviršiaus temperatūra; T_{mod} – fotovoltinio modulio temperatūra.

Laikantis trečiojo Niutono dėsnio galima teigti, kad fotovoltinio modulio ir aplinkos temperatūros veikia priešingomis kryptimis viena kitos atžvilgiu. Bendras energijos kitimas fotovoltinio modulio paviršiuje gali būti užrašomas taip:

$$P_{\text{konv}} = -h_k (T_{\text{mod}} - T_{\text{apl}}) S_p, \quad (2.19)$$

čia h_k – šilumos konvekcijos koeficientas; T_{apl} – aplinkos temperatūra.

Šilumos konvekcijos koeficiento h_k vertė priklauso nuo fotovoltinio moduli tvirtinimo būdo (fizinio instaliavimo). Konvekcija gali būti natūrali ir priverstinė. Kai modulių galinė pusė uždengta, o aplinkos sąlygos nekinta arba kinta labai lėtai, fotovoltinio moduli paviršiuje vyksta natūrali konvekcija. Jeigu diena yra vėjuota, šilumos konvekcija fotovoltinio moduli paviršiuje vyks greičiau.

Esant natūraliam aušinimui konvekcijos koeficientas yra proporcingas galios ir temperatūros skirtumui tarp fotovoltinio moduli ir aplinkos oro. Šiuo atveju fotovoltinio moduli konvekcijos koeficiento skaičiavimui reikia naudoti laisvosios konvekcijos aproksimaciją plokščiam paviršiui ore, kuri pateikta (Holman, 1992):

$$h_{k \text{ lais}} = 1,31 (T_{\text{mod}} - T_{\text{apl}})^{\frac{1}{3}}, \quad (2.20)$$

čia $h_{k \text{ lais}}$ – laisvasis konvekcijos koeficientas $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 1,31 – empiriniu būdu gautas koeficientas, kurio matavimo vienetai $\text{W}^{\frac{4}{3}}/(\text{m}^2 \text{K}^{\frac{4}{3}})$.

Esant tipinių aplinkos sąlygų dienai, galima priimti, kad bendra šilumos konvekcijos suma yra lygi priekinės ir galinės fotovoltinio moduli šilumos konvekcijos sumai. Šiuo atveju šilumos konvekcijos galią fotovoltiniame modulyje apskaičiuojama taip:

$$P_{\text{konv}} = -(h_{k \text{ pad}} + h_{k \text{ lais}}) (T_{\text{mod}} - T_{\text{apl}}) S_p, \quad (2.21)$$

čia $h_{k \text{ pad}}$ – padidėjusios konvekcijos koeficientas $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$.

Literatūroje siūloma padidėjusios konvekcijos koeficientą aproksimuoti kaip vėjo greičio tiesinę funkciją (Thijs *et al.* 2010).

Fotovoltinio moduli sukuriamos elektros galia skaičiuojama atsižvelgiant į jo srovės ir įtampos kreivės užpildymo koeficientą (angl. *fill factor* – FF) ir išreiškiama taip:

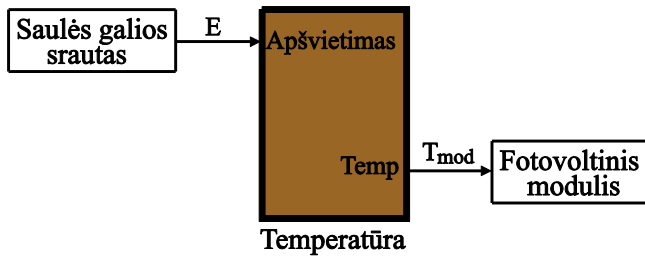
$$P_{\text{is}} = C_{\text{FF}} \frac{E \ln(k_1 E)}{T_{\text{mod}}}, \quad (2.22)$$

čia P_{is} – fotovoltinio moduli išėjime sukuriamos elektros galia; C_{FF} – fotovoltinio moduli užpildymo koeficientas, $C_{\text{FF}} = 1,22 \text{ K} \cdot \text{m}^2$; k_1 – konstanta, $k_1 = 10^6 \text{ m}^2/\text{W}$.

Išraišius (2.15), (2.18), (2.21) ir (2.22) išraiškas į pagrindinę (2.13) formulę, gauname tokią išraišką fotovoltinio modulio temperatūros kitimui apskaičiuoti:

$$C_{\text{mod}} \frac{dT_{\text{mod}}}{dt} = \alpha \cdot E_{\Sigma} \cdot S_p + \sigma \left(E_{\text{dan}} (T_{\text{apl}} - \delta T)^4 - E_{\text{mod}} T_{\text{mod}}^4 \right) S_p + \\ - (h_{k \text{ pad}} + h_{k \text{ lais}}) (T_{\text{mod}} - T_{\text{apl}}) S_p - C_{\text{FF}} \frac{E \ln(k_1 E)}{T_{\text{mod}}}, \quad (2.23)$$

čia $\delta T = 20 \text{ K}$ esant giedrai dienai.



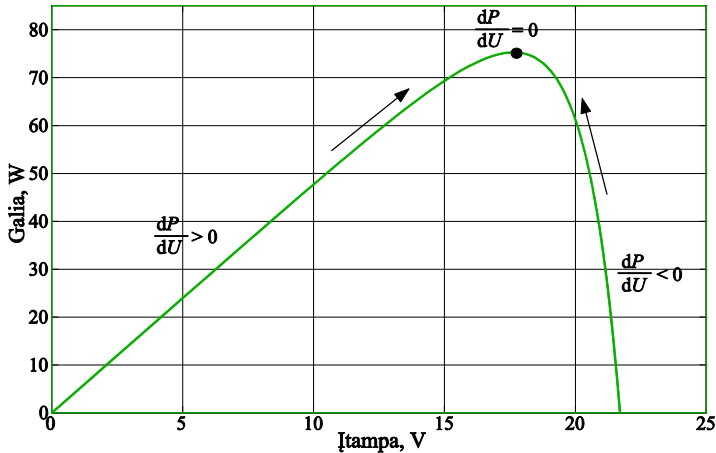
2.6 pav. Fotovoltinių modulių modelių temperatūros keitimo bloko sukurtos *Matlab*[®]/*Simulink*[®] terpėje blokinė schema

Fig. 2.6. Block diagram of temperature variation implemented in *Matlab*[®]/*Simulink*[®]

Sudarytas fotovoltinio modulio temperatūros kitimo matematinis modelis *Matlab*[®]/*Simulink*[®] terpėje yra pateiktas 2.6 paveiksle pavadinimu *Temperatūra*. Blokas turi vieną įėjimo signalą *Apšvietimas* – skirtą matuoti saulės galios srautą E patenkantį į fotovoltinio modulio paviršių ir vieną išėjimo signalą *Temp* – generuojantį fotovoltinio modulio temperatūrą T_{mod} atitinkamu laiko momentu.

2.3. Didžiausios galios taško sekimo modelis

Sudarant fotovoltinės jėgainės modelį didžiausios galios taško sekimui pasirinktas *IncCond* algoritmas (Srushti and Uttam 2013). Šis algoritmas pasirinktas dėl nesudėtingos valdymo struktūros ir gebėjimo palaikyti fotovoltinės jėgainės režimą aptiktame DGT (Divya and Raghavendar 2012). Be to, esant nesudėtingai valdymo struktūrai FV jėgainėje reikalingi mažesni skaičiavimo resursai ir jėgainės valdymo procesai vyksta sparčiau. Fotovoltinės jėgainės modelyje įdiegto DGT sekimo algoritmo veikimas pateiktas 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Didžiausios galios taško sekimas taikant *Incremental Conductance* algoritmą
Fig. 2.7. Maximum power point tracking using *Incremental Conductance* algorithm

Fotovoltinėje jėgainėje didžiausia galia pasiekama tuomet, kai sukurtos elektros galios išvestinė pagal išėjimo įtampą dP/dU artėja prie nulio (Amarnath and Suresh 2013). Algoritmo vykdomi pokyčio skaičiavimai pagrįsti didėjančia įtampa bei galia fotovoltinių modulių išėjime. Jeigu galios išvestinė dP/dU nelygi nuliui, tuomet valdiklis keičia įtampą, kol galios išvestinė priartėja prie nulio. Tokiu būdu pasiekama didžiausia galia jėgainės išėjime. Stebint apskaičiuotą rezultatą valdiklis pagal algoritmą, nusprendžia įtampą reikia padidinti ar sumažinti. Tam, kad įvertinti, kurioje didžiausios galios taško pusėje yra jėgainės darbo režimas, algoritme yra įrašytos šios sąlygos:

- įtampa turi būti padidinta, kai $\frac{dP}{dU} > 0$;
- įtampa turi būti sumažinta, kai $\frac{dP}{dU} < 0$;
- jėgainė veikia DGT, kai $\frac{dP}{dU} = 0$.

Kadangi įgyvendinant algoritmą matematiniame modelyje nustatomas diskrečiąją 1 s atitinkantis darbo dažnis 1 Hz, todėl įtampos ir srovės išvestinės skaičiuojamos apytiksliai:

$$\frac{dI}{dU} \approx \frac{\Delta I}{\Delta U} , \quad (2.24)$$

$$\Delta I = I(t) - I(t-1), \quad (2.25)$$

$$\Delta U = U(t) - U(t-1), \quad (2.26)$$

čia ΔI ir ΔU – srovės ir įtamos pokytis per 1 s; $I(t)$ ir $I(t-1)$ – fotovoltinės jėgainės srovės vertė laiko momentu t ir prieš 1 s; ir įtampa laiku t ; $U(t)$ ir $U(t-1)$ – fotovoltinės jėgainės įtamos vertė laiko momentu t ir prieš 1 s; ir įtampa laiku t ;

Sudarant matematinį *IncCond* algoritmo modelį, įgyvendinti tokie nuoseklaus veikimo algoritmo žingsniai:

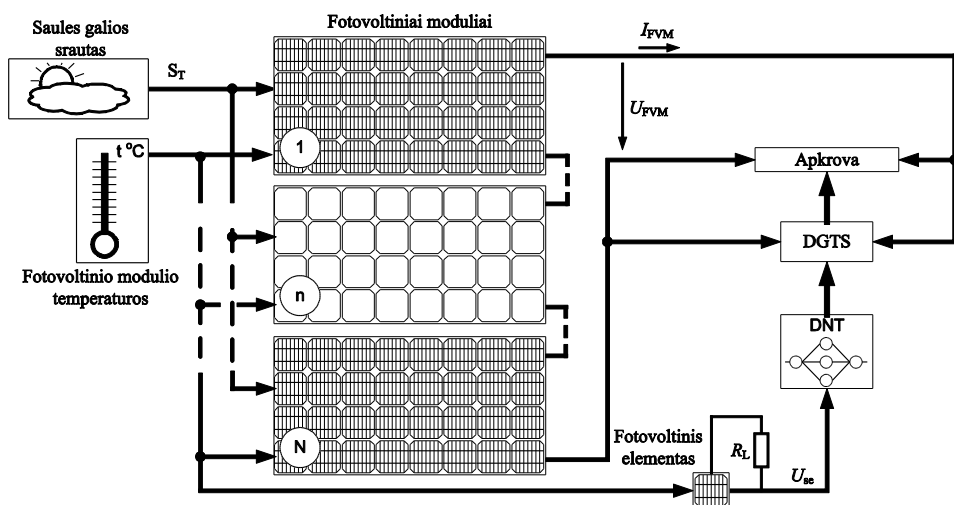
1. Nuskaitomos įtamos ir srovės vertės jėgainės išėjime paleidimo metu.
2. Nuskaitomos esamos įtamos ir srovės vertės. Įtamos ir srovės verčių nustatymas vyksta kas 1 s.
3. Pagal (2.25) ir (2.26) formules apskaičiuojami įtamos ir srovės pokyčiai esamu momentu ir prieš 1 s.
4. Vykdomas pirminis sistemos įvertinimas, kurio metu tikrinama ar jėgainė veikia didžiausioje galios taške. Jeigu įtampa nepakito, pereinama prie kito žingsnio, kurio metu tikrinamas bendras įtamos ir srovės pokytis.
5. Jeigu srovės ir įtamos pokyčio santykis lygus išmatuotam srovės ir įtamos santykiui laikoma, kad jėgainė veikia didžiausioje galios taške ir apkrovos keisti nereikia. Jeigu išmatuotos srovės ir įtamos santykis nesutampa, laikoma, kad jėgainė veikia ne didžiausios galios režime ir pereinama prie sekančio žingsnio veiksmų.
6. Jeigu įtamos ir srovės pokytis yra didesnis už išmatuotą vertę tuomet laikoma, kad fotovoltinė jėgainė veikia kairiojoje didžiausios galios taško pusėje (2.7 pav.) ir yra nepasiekusi DGT. Todėl apkrova padidinama žingsniu ΔR . Priešingu atveju laikoma, kad jėgainė yra apkrauta per daug ir veikia dešiniau didžiausios galios taško (2.7 pav.) – apkrova sumažinama žingsniu ΔR .
7. Jeigu ketvirtajame žingsnyje įtampa pakito, tuomet tikrinama ar pakito srovė jėgainės išėjime. Jeigu srovė nepakito, laikoma, kad jėgainė veikia didžiausioje galios taške ir pereinama prie paskutinio algoritmo žingsnio veiksmų. Jeigu srovė pakito, pereinama prie kito algoritmo žingsnio, kurio metu tikrinama kiek pasikeitė srovė jėgainės išėjime.
8. Jeigu srovės pokytis yra teigiamas laikoma, kad fotovoltinė jėgainė veikia nepasiekusi didžiausios galios taško, todėl apkrova padidinama žingsniu ΔR .
9. Kai srovės pokytis yra neigiamas, laikoma, kad fotovoltinė jėgainė yra apkrauta per daug, todėl apkrova sumažinama žingsniu ΔR .

10. Paskutiniajame algoritmo žingsnyje įrašomos naujos įtampos ir srovės vertės atitinkančios didžiausios galios taško režimą, kurios bus naudojamos sekančio ciklo metu. Pasibaigus didžiausios galios taško nustatymo ciklui, grįžtama į algoritmo pradžią ir vėl nuosekliai vykdomi algoritmo žingsniai kito didžiausios galios taško nustatymo ciklui.

Algoritmo tyrimo metu buvo naudojami įvairūs apkrovos keitimo žingsniai. Tiriama apkrovos žingsnio dydžio įtaka greitai ir tiksliai aptikti didžiausios galios tašką fotovoltinėje jėgainėje.

2.4. Dirbtinių neuronų tinklo panaudojimas fotovoltinės jėgainės modelyje

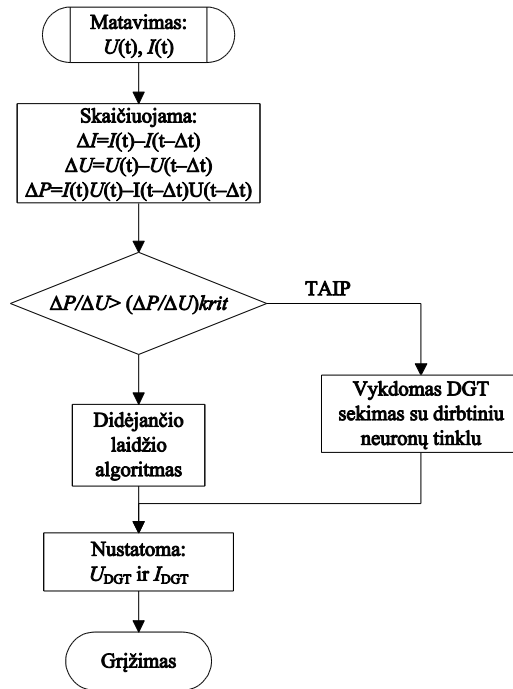
Dėl netobulo didžiausios galios taško fotovoltinėje jėgainėje sekimo algoritmo mokslininkai, inžinieriai ieško galimybių jį tobulinti. Rinkoje egzistuojantys DGT sekimo įtaisai geba efektyviai sekti didžiausią galios tašką tik esant nusi-stovėjusioms aplinkos sąlygoms arba joms kintant lėtai. Pagrindiniai tokių didžiausios galios taško sekimo algoritmų trūkumai pasireiškia, kai aplinkos veiksniai, įtakojantys fotovoltinio modulio darbo charakteristikas, pradeda ypač greitai kisti. Tuomet susiduriama su problema – didžiausios galios taško sekimo algoritmas nesugeba greitai ir tiksliai aptikti didžiausios galios taško fotovoltinėje jėgainėje. Literatūroje aprašomi ir praktikoje naudojami DGT sekimo algoritmai sudaryti taip, kad juos diegiant į realiai veikiančias sistemas, renkamas tarp greitai aptinkančio ir itin tiksliai aptinkančio didžiausios galios taško sekimo būdo. Kadangi didinant DGT aptikimo tikslumą, ilgėja laikotarpis iki didžiausios taško aptikimo momento. Ir atvirkščiai – siekiant sumažinti DGT aptikimo trukmę, mažėja jo aptikimo tikslumas. Šiai problemai spręsti disertaciniame darbe numatyta panaudoti dirbtinių neuronų tinklą.



2.8 pav. Fotovoltinės jėgainės dirbančios su dirbtinių neuronų tinklu struktūrinė schema
Fig. 2.8. Block diagram of the solar power plant operation with artificial neural network

Fotovoltinėje jėgainėje, sekant didžiausios galios tašką, dirbtinių neuronų tinklas naudojamas kaip papildoma priemonė. Fotovoltinės jėgainės turinčios dirbtinių neuronų tinklą struktūrinė schema pateikta 2.8 paveiksle. Fotovoltinė jėgainę sudaro fotovoltinių modulių tinklas, kurio išėjime generuojama momentinė įtampa bei srovė. Įtampos bei srovės vertės priklauso nuo tuo metu patenkančio į fotovoltinio modulio paviršių saulės galios srauto bei temperatūros signalų. Generuojami įtampos ir srovės signalai patenka į apkrovos valdymo bloką bei didžiausios galios taško sekimo bloką. Pagal išmatuotas įtampos ir srovės vertes didžiausios galios taško sekimo algoritmas atitinkamai reguliuoja apkrovą fotovoltinės jėgainės išėjime. Pagrindinis valdymo algoritmas sudarytas taip, kad esant greitai pasikeitusioms fotovoltinės jėgainės veikimo sąlygoms, didžiausios galios taško sekimą perima dirbtinių neuronų tinklas, kuris yra įgyvendintas DNT bloke. Detalus valdymo algoritmas pateiktas 2.9 paveiksle.

Dėl pasirinktos algoritmo struktūros reakcijos laikas, kai priartėjama prie didžiausios galios taško, yra trumpesnis nei naudojant algoritmą be DNT. Apmokytas dirbtinių neuronų tinklas geba greitai parinkti įtampos ir srovės vertes artimas optimalioms ir leidžiančias arčiau priartėti prie didžiausios galios taško. Sistemai pradėjus veikti arti DGT, *IncCond* algoritmas perima didžiausios galios taško paiešką ir fotovoltinio modulio darbo režimą tiksliai perveda į didžiausios galios tašką.



2.9 pav. Valdymo algoritmas grįžtas dirbtinių neuronų tinklo panaudojimu

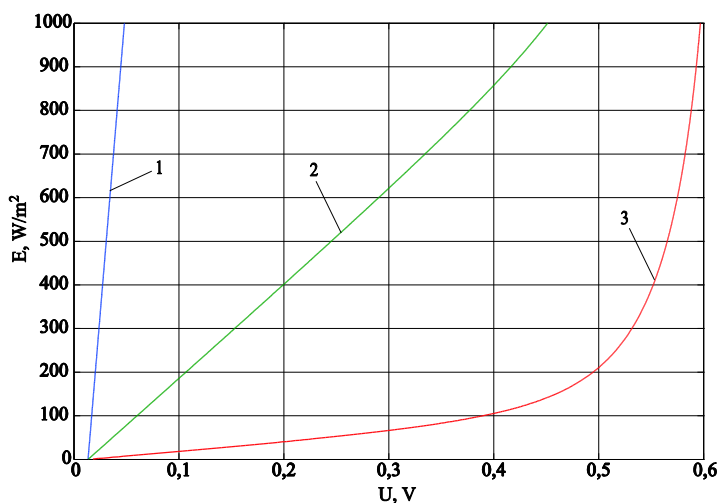
Fig. 2.9. Structural diagram of algorithm with artificial neural network

Didžiausios galios aptikimui naudojamos išmatuotos įtampos ir srovės vertės, kurios lyginamos su prieš tai buvusiomis. Tam apskaičiuojamas santykinis išėjimo galios pokytis $\frac{\Delta P}{\Delta U}$. Tolimesniam algoritmo veiksmui nustatyti naudo-

jama vertė $\frac{\Delta P}{\Delta U}_{krit}$. Dirbtinių neuronų tinklas pradeda didžiausios galios taško

paiešką, kai $\frac{\Delta P}{\Delta U} > \frac{\Delta P}{\Delta U}_{krit}$. Jeigu sąlyga neatitinka tam, kad fotovoltinis modulis būtų tiksliai DGT režime, didžiausios galios taško paiešką ir sekimą vykdo *IncCond* algoritmas.

Valdymo sistema, kurios veikimas pagristas dirbtinių neuronų tinklu ir *IncCond* algoritmu, didžiausios galios tašką sugeba aptikti greitai ir tiksliai, kadangi *IncCond* algoritmas pradeda veikti tik tuomet, kai priartėjama arti prie didžiausios galios taško. Tai leidžia *IncCond* algoritmui veikti režimu keičiančiu apkrovą mažu žingsniu ir tiksliai aptikti didžiausios galios tašką nesugaištant daug laiko (Hong *et al.* 2010).



2.10 pav. Pavienio fotovoltinio elemento įtampos kitimo grafikas, kai apkrova:
1 – 0,01 Ω ; 2 – 0,1 Ω ; 3 – 1,0 Ω

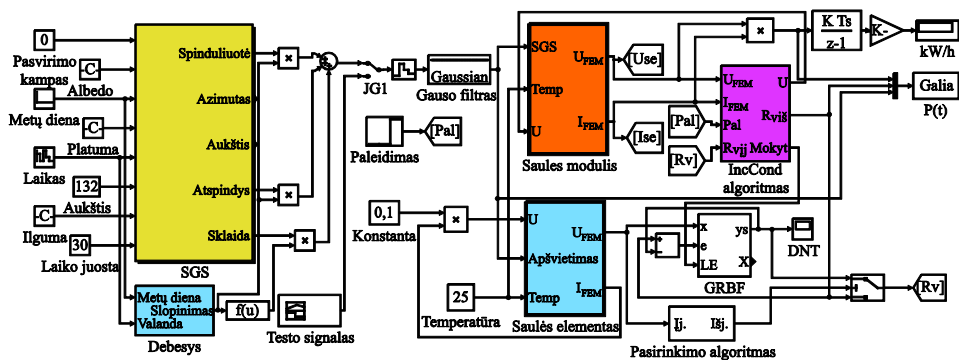
Fig. 2.10. Voltage curve of photovoltaic cell dependence on different load resistance 1 – 0.01 Ω ; 2 – 0.1 Ω ; 3 – 1.0 Ω

Matematinis fotovoltinės jėgainės modelis sudarytas taip, kad galėtų būti įgyvendintas tolimesniuose imitaciniuose ir praktiniuose tyrimuose. Todėl vietoj piranometro, skirto matuoti saulės galios srautą, pasirinktas pavienis fotovoltinis elementas, kuris apkrautas fiksuota apkrova. Kintant saulės galios srauto intensyvumui, įtampa šio įtaiso išėjime taip pat kinta. Toks sprendimas leidžia saulės galios srautui matuoti skirtą nekrytinį ir brangų piranometrą pakeisti paprastu ir pigiu įtaisu. Pasirinkto pavienio fotovoltinio elemento įtampos priklausomybė nuo saulės galios srauto pateikta 2.10 paveiksle. Iš šio paveikslo grafikų matyti, kad fotovoltinis elementas turi būti apkrautas varža, kuri negali būti didelė, nes SGS priklausomybė nuo įtampos tampa ne tiesinė, o parinkus per mažą varžą – mažėja priklausomybės tikslumas ir dirbtinių neuronų tinklas gali priimti klaidingus sprendimus.

Taigi *IncCond* algoritmo taikymas kartu su dirbtinių neuronų tinklu yra efektyvus – *IncCond* algoritmas pasiekęs didžiausią galios tašką gali likti jame ir veikti, kol įvyks galios pokyčiai, o esant greitai besikeičiančioms aplinkos sąlygoms dirbtinių neuronų tinklas sugeba taip pat greitai į jas sureaguoti ir leisti *IncCond* algoritmui veikti kuo arčiau pasikeitusio didžiausios galios taško. Algoritmui greitai sureagavus į atsirandančius pokyčius, mažiau laiko sugaištama naujo didžiausios galios taško aptikimui, o tai leidžia iš krintančio saulės galios srauto sukurti daugiau elektros energijos.

2.5. Matematinis fotovoltinės jėgainės modelis

Pagal saulės jėgainės struktūrinę schemą sudarytas matematinis saulės jėgainės modelis įgyvendintas *Matlab/Simulink* terpėje pateiktas 2.11 pav. Saulės galios srauto bloke (SGS) sukuriamas signalas imituojantis saulės galios srautą, krantinę į fotovoltinį modulį (Vasarevičius *et al.* 2010). Saulės galios srauto signalui valdyti naudojami parametrai: pasvirimo kampas, albedo, metų diena, platumas, laikas, aukštis, ilguma, laiko juosta. Šiais parametrais imituojamas SGS skirtingose žemės paviršiaus vietose konkrečiu laiku. Sukurtame modelyje imituojamas šviesiojo paros laiko saulės galios srauto signalas, kurio trukmė – 14 valandų. Modelyje numatyta, kad saulė teka 6:00 val., o 20:00 val. – leidžiasi.



2.11 pav. *Matlab*[®]/*Simulink*[®] modelis didžiausios galios taško paieškos ir sekimo tyrimams taikant dirbtinių neuronų tinklą

Fig. 2.11. *Matlab*[®]/*Simulink*[®] model for development of MPPT algorithms with artificial neural network

Kad būtų galima saulės jėgainės valdiklio efektyvumą tirti esant sudėtingoms aplinkos sąlygoms, modelyje numatytas debesuotumo imitavimo blokas (*Debesys*). Šio bloko paskirtis chaotiškai slopinti generuojamą SGS signalą ir imituoti debesų slinkimą danguje. SGS ir debesų blokų išėjimų signalų suma, siunčiama į Gauso filtrą. Tokiu būdu, gaunamas saulės galios srauto signalas imituojantis realiomis aplinkos sąlygomis gaunamą signalą.

Šis signalas siunčiamas į fotovoltinį modulį ir pavienį fotovoltinį elementą imituojančius modelio blokus. Taip imituojamas ant fotovoltinio modulio paviršiaus patenkantis saulės galios srautas. Imituojant fotovoltinį modulį ir pavienį fotovoltinį elementą būtina nurodyti jų paviršiaus temperatūrą. Tyrimo metu priimta, kad paviršiaus temperatūra nekinta ir lygi 25 °C.

Fotovoltinės jėgainės valdiklį modelyje imituoja 2.11 paveikslo. dešinėje esantis *IncCond* algoritmo įgyvendinimo blokas (*IncCond algoritmas*), skirtas

didžiausio galios taško jėgainėje paieškai ir sekimui bei dirbtinių neuronų tinklo mokymui. DNT mokomas tik tuomet, kai *IncCond* algoritmas yra didžiausiame galios taške arba esant itin mažai nuokrypai nuo didžiausios galios taško. Kai dirbtinių neuronų tinklas yra pakankamai apmokytas, DGT sekimą vykdo dirbtinių neuronų tinklo blokas (*GRBF*). Didžiausios galios taško sekimo priemonę parenka modelyje įgyvendintas pasirinkimo algoritmo blokas 2.11 paveiksle pavadintas *Pasirinkimo algoritmas*. Jis didžiausios galios taško sekimui parenka *IncCond* algoritmą arba dirbtinių neuronų tinklą.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

Sudarant matematinius modelius skirtus fotovoltinės jėgainės tyrimams atlikti, galima padaryti tokias išvadas:

1. Sudarytas atskiro fotovoltinio modulio imitacinis modelis, kurio darbo režimą, veikimo charakteristikas galima keisti ir pritaikyti realybėje egzistuojančiam fotovoltinio modulio tipui tirti. Norint padidinti fotovoltinėje jėgainėje generuojamos elektros įtampą, išlaikant srovės dydį, reikia sudarytus fotovoltinio modulio imitacinius modelius sujungti nuosekliai. Taip imituojamas realus modulių sujungimas į vieną grandinę. Sudarytu modeliu pasiremęs, realios FV jėgainės detalios ištiriamos praktiškai be klaidų.
2. Darbo metu fotovoltinis modulis įkaista ir jo temperatūra pasiekia ir viršija 70 °C. Sudarytas matematinis fotovoltinio modulio temperatūros kitimo modelis leidžia imituoti fotovoltinio modulio įkaitimą. Temperatūros kitimui modelyje įvertinti pasiremama saulės galios srauto intensyvumu, aplinkos temperatūra ir vėjo greičiu.
3. Siekiant detaliau ištirti vieno iš dažniausiai taikomo praktikoje didžiausios galios taško sekimo algoritmo privalumus ir trūkumus, sudarytas fotovoltinės jėgainės didžiausios galios taško sekimo tradicinio algoritmo modelis įgyvendintas atskirame programos bloke, kuris leidžia tyrimo metu nesudėtingai keisti bet kuriuos fotovoltinės jėgainės valdymo parametrus.
4. Ant fotovoltinės jėgainės modulių dėl debesų ir kitų faktorių susidaro šešėliai, kurie ženkliai sumažina fotovoltinės jėgainės darbo efektyvumą. Efektyvumui padidinti reikia naudoti apėjimo diodus. Fotovoltinės jėgainės su apėjimo diodais galios charakteristikoje susidaro daug lokalių maksimumo taškų, kurie negarantuoja didelio jėgainės darbo efektyvumo. Panaudojus dirbtinių neuronų tinklą modelyje sudarytas atskiras didžiausios galios taško sekimo algoritmo blokas leidžia išvengti jėgai-

nės darbo lokaliuose maksimumuose režimų, greičiau ir tiksliau sekti didžiausios galios tašką, padidinti fotovoltinės jėgainės našumą.

5. Sudarytas bendras fotovoltinės jėgainės matematinis modelis, kuris leidžia tirti įvairios galios jėgaines. Tyrimų metu modelyje galima imituoti įvairias jėgainės veikimo sąlygas, imituojant kintantį saulės galios srautą, modulio temperatūrą, bei naudojant skirtingus didžiausios galios taško sekimo algoritmus. Eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad sudarytas fotovoltinės jėgainės modelis yra tinkamas fotovoltinių jėgainių tyrimui, jų darbo efektyvumo prognozavimui ir jų valdymui.

Fotovoltinės jėgainės tyrimas neprognozuojamomis aplinkos sąlygomis

Šiame skyriuje pateiktų tyrimų tikslas – pasinaudojus sudarytu matematiniu modeliu ištirti fotovoltinės jėgainės didžiausios galios taško sekimo algoritmų efektyvumą neprognozuojamai kintančiomis aplinkos sąlygomis ir pasiūlyti efektyvų fotovoltinės jėgainės apkrovos keitimo būdą.

Pradiniame tyrimų etape vykdoma sukurtų fotovoltinių modulių modelių patikra, kurios metu palyginamos imitaciniais skaičiavimais gautos fotovoltinio modulio charakteristikos su eksperimento metu išmatuotomis atitinkamos galios ir kitų parametrų fotovoltinio modulio charakteristikomis. Patvirtinus gautų imitacinių skaičiavimų atitikimą eksperimentiniams, tiriamas fotovoltinės jėgainės veikimas, kai saulės galios srautas kinta chaotiškai, t. y. imituojamas debesų slinkimas danguje. Siekiant priartinti jėgainės veikimą realioms veikimo sąlygoms, imituojamas kintantis saulės galios srautas ir su besikeičiančiu saulės galios srautu susietas modulio temperatūros kitimas. Siekiant ištirti fotoelektrinių modulių temperatūros reguliavimo poveikį jų darbo efektyvumui atlikti imitaciniai skaičiavimai, kai veikiančioje jėgainėje fotovoltinių modulių temperatūra palaikoma ne aukštesnė nei tam tikra. Tyrimai pabaigiami patobulinto, įdiegus dirbtinių neuronų tinką į didžiausios galios taško sekimo algoritmą, valdiklio

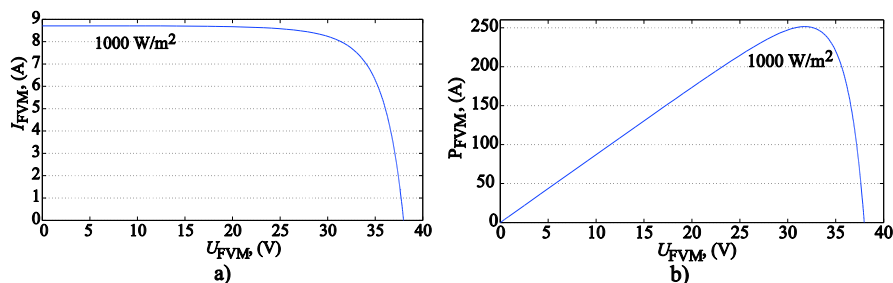
Fotovoltinių modulių eksperimentinių tyrimų metu buvo naudojamas specializuotas matavimų stendas, kurio bendras vaizdas pateiktas A priede. Stende panaudota tokia matavimo įranga: BERGER Lichttechnik Pulse Solar Load PSL 8, Pulse Solar Load IR-Sens, Pulse Solar Load PT 100, Pulse Solar Simulator PSS 8. Matavimo procesui valdyti, matavimo rezultatams apdoroti ir vizualizuoti stende panaudota *Pulsed Solar Load*[®] programinė įranga, kuri leidžia eksperimentuoti su įvairios galios ir matmenų fotovoltiniais moduliais. Modulių charakteristikų matavimai vykdomi tik suderinus įrangą specialiu (etaloniniu) fotovoltiniu moduliu. Po įrangos suderinimo stendo gamintojas garantuoja, kad tiriamų modulių išmatuotų darbinių charakteristikų neapibrėžtis neviršys $\pm 1,9\%$.

3.1 lentelė. Eksperimentams naudoto fotovoltinio modulio parametrai

Table 3.1. Parameters of experimental photovoltaic module

| Modulio parametras | Vertė |
|---|-------|
| Modulio galia, W | 250 |
| Didžiausios galios srovė, A | 8,30 |
| Didžiausios galios įtampa, V | 30,14 |
| Trumpo jungimo srovė, A | 8,87 |
| Tuščios veikos įtampa, V | 37,57 |
| Temperatūrinis trumpojo jungimo srovės koeficientas α_{tr} , $\%/^{\circ}\text{C}$ | 0,05 |
| Temperatūrinis tuščios veikos įtamos koeficientas β_{aj} , $\%/^{\circ}\text{C}$ | -0,34 |

Sudarytų modulių patikrai pasirinktas 250 W polikristalinių silicio elementų fotovoltinis modulis, kurio pagrindiniai parametrai pateikti 3.1 lentelėje.



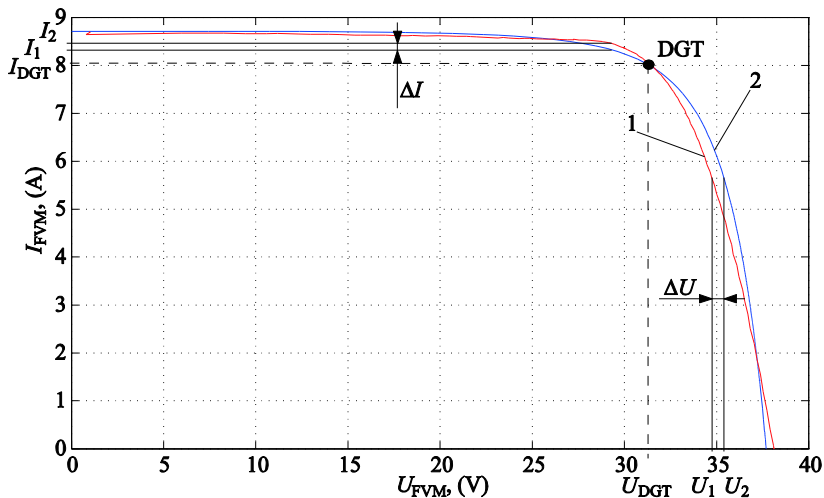
3.2 pav. 250 W fotovoltinio modulio voltamerinė (a) ir galios (b) charakteristikos

Fig. 3.2 Voltage-current and power characteristics of 250 W mathematical photovoltaic module

3.1 paveiksle pateikti eksperimento metu gauti rezultatai stendo matavimo rezultatų išvesties įrenginyje. 3.2 paveiksle pateiktos imitaciniais skaičiais pagal sudarytus modelius gautos voltamerinė ir galios charakteristikos. 3.3 pa-

veiksle pateiktos sutapdintos eksperimento metu išmatuotos (3.1 pav.) ir imitaciniais skaičiavimais gautos (3.2 pav.) voltamperinės charakteristikos.

Iš 3.3 paveikslo matyti, kad skirtingais metodais gautos voltamperinės charakteristikos labai artimos. Voltamperinių charakteristikų didžiausios galios taško aplinkoje, kurios 3.3 paveiksle pažymėtos atitinkamai ΔU ir ΔI , yra santykinai mažos – jų atitinkamos santykinės vertės neviršija įtampai 1,7 %, o srovei – 1,1 %. Didžiausia galia skiriasi tik 0,04 %. Šios nuokrypos atsiranda dėl matavimų įrangos neapibrėžčių, kurios siekia 1,9 %. Taigi, įvertinus įrangos gamintojo deklaruojamą $\pm 1,9$ % neapibrėžtį, galima teigti, kad fotovoltinio modulio modelis atitinka 250 W modulio galios klasę ir visiškai apibūdina realiaame fotovoltiniame modulyje vykstančius fizikinius procesus.



3.3 pav. Sutapdintos 250 W fotovoltinio modulio skirtingu būdu gautos voltamperinės charakteristikos: 1 – eksperimento metu išmatuotos; 2 – imitaciniais skaičiavimais gautos

Fig. 3.3 Superposed voltage–current characteristics of 250 W photovoltaic module: 1 – generated voltage–current characteristic of real photovoltaic module; 2 – simulated voltage–current characteristic of mathematical model

Vykdamas sudarytų modelių patikrą antruoju būdu, modelio patikrai panaudo- ti (Hairul, Saad 2010; Altas, Sharaf 2007; Vikrant 2005; Dominique 2013) dar- buose aprašomų fotovoltinių modulių parametrai ir panaudojant darbe sudarytus modelius apskaičiuotos fotovoltinių modulių voltamperinės ir galios charakte- ristikos esant skirtingam saulės galios srautui. Bandymams naudotas fotovoltinis modulis sudarytas iš 36 fotovoltinių elementų, kurių bendra galia yra 60 W esant

standartinėmis bandymo sąlygomis. Palyginus skaičiavimo rezultatus su pateiktais minėtuose darbuose, gautas galios nuokrypis neviršija 1,5 % (3.2 lentelė). Tai dar kartą įrodo, kad matematinis fotovoltinio modulio modelis sudarytas gerai.

3.2 lentelė. Skirtingais matematiniais modeliais sudaryto fotovoltinio modulio galios palyginimas

Table 3.2. Power comparison of implemented photovoltaic module in different mathematical models

| | Saulės galios srautas esant 25 °C fotovoltinio modulio temperatūrai (W/m ²) | | | | |
|--|---|------|------|------|------|
| | 1000 | 800 | 600 | 400 | 200 |
| FV modulio galia gauta aprašomoje literatūroje (W) | 60 | 43,6 | 32,3 | 21,8 | 9,4 |
| FV galia gauta imitacijos metu (W) | 60 | 44,1 | 32,7 | 22,1 | 9,5 |
| Galios nuokrypis (W) | 0 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,1 |
| Galios nuokrypis (%) | 0 | 1,15 | 1,24 | 1,38 | 1,06 |

Taigi eksperimentų rezultatai ir imitacijos rezultatų palyginimas su kitų autorių darbo rezultatais leidžia teigti, kad sudarytas matematinis modelis tiksliai imituoja realiaame fotovoltiniame modulyje vykstančius procesus ir todėl gali būti naudojamas tolimesniems tyrimams.

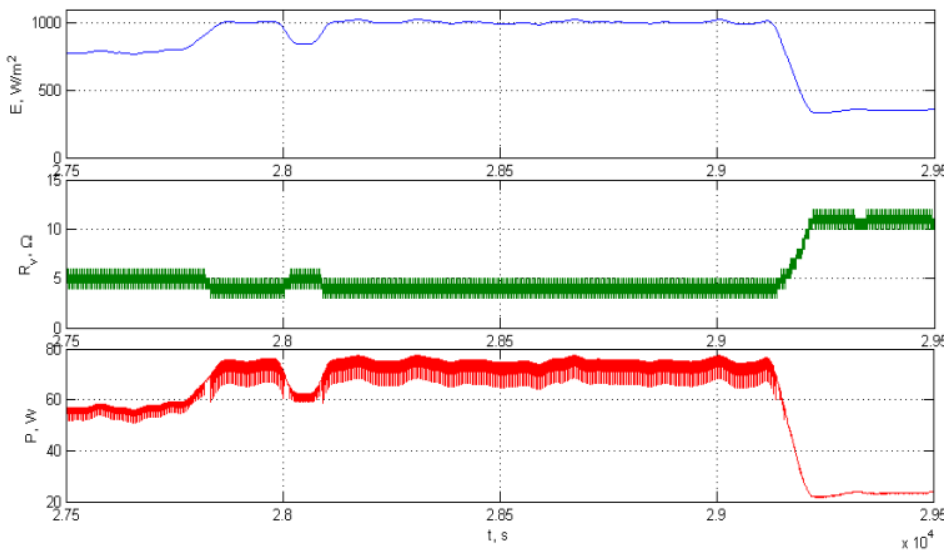
3.2. Didėjančio laidžio algoritmo tyrimas

Valdymo algoritmo tyrimui buvo sukurti skirtingus saulės galios srautus imituojantys duomenų masyvai. Duomenų masyvai imituoja įvairias aplinkos sąlygas – greitą, lėtą arba tolygų saulės galios srauto kitimą pasirinktos paros metu. Iš šių duomenų nubraižyti grafikai vaizduojantys saulės galios kitimą šviesiuoju paros metu.

Kuriamame didžiausios galios taško sekimo algoritme buvo pasirinktas kombinuotas valdymas. Algoritme kaip vienas iš valdymo elementų yra panaudotas didėjančio laidžio algoritmas. Todėl tyrimo metu buvo gilinamasi į šio algoritmo trūkumus ir privalumus. Tiriant algoritmą buvo pasirinktas tą patį saulės galios srautą imituojantis duomenų masyvas ir panaudotas didėjančio laidžio algoritme esant skirtingiems jo veikimo režimams.

Dėl ilgai truncančių imitacinių skaičiavimų, buvo nuspręsta sutrumpinti visos paros saulės galios srautą imituojantį signalą ir tirti algoritmą tik šviesiuoju paros laikotarpiu laikant, kad saulės teka 5 val. 30 min. ir nusileidžia 20 val. 30 min. Sukurtas imitacinių duomenų masyvas kaip 15 val. trukmės saulės galios srauto signalas išsaugotas duomenų bazėje ir naudojamas įvairiems algoritmo režimams tirti. Tokiu būdu žinant, kad tiriamais atvejais saulės galios srautas yra tas pats galima lyginti gautus rezultatus. Saulės galios srauto signalo sutrumpinimas iki 15 valandų neturi jokios įtakos tyrimo rezultatams, nes fotovoltinės jėgainės veikia tik šviesiuoju paros metu, kai saulės spinduliai patenka į fotovoltinio modulio paviršių.

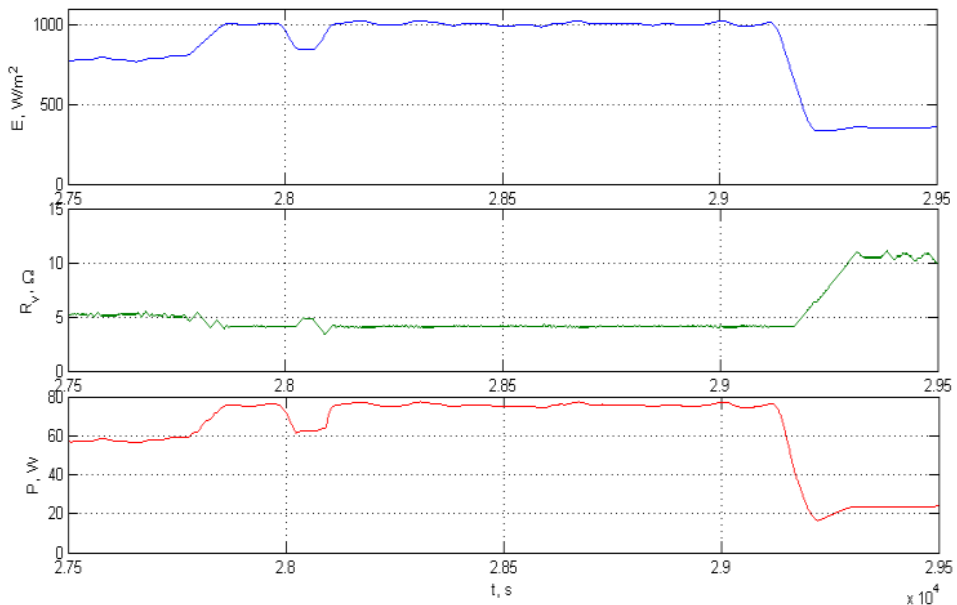
Analizė parodė, kad didžiausia problema sekant didžiausios galios tašką fotovoltinėje jėgainėje didėjančio laidžio algoritmu susidaro, kai parenkamas netinkamas apkrovos varžos keitimo žingsnis. Todėl didėjančio laidžio algoritmas buvo tiriamas esant įvairiems apkrovos varžos keitimo žingsniams. Tyrimo metu buvo nustatoma žingsnio dydžio įtaka fotovoltinės jėgainės našumui.



3.4 pav. 33 min trukmės saulės galios srauto, apkrovos varžos ir generuojamos elektros galios kitimo laike fragmentas gautas imitacinių skaičiavimų metu, kai apkrovos keitimo žingsnis $\Delta R = 1 \Omega$

Fig. 3.4 Simulation of solar power flux, load resistance and generated power in 33 min calculation, when changing step of load resistance is $\Delta R = 1 \Omega$

Pirmojo tyrimo metu buvo nustatytas apkrovos keitimo žingsnis lygus $\Delta R = 1 \Omega$. Aplinkos temperatūra tyrimo metu buvo laikoma nekintanti ir lygi 25°C . Grafikai apibūdinantys visą imituojamą 15 val. trukmės fotovoltinės jėgainės darbą pateikti B.1 priede. 3.4 paveiksle pavaizduotas tik 33 min. trukmės fragmentas, leidžiantis detaliai ištirti *IncCond* algoritmo veikimą. Iš grafiko matyti, kad vos tik pasikeitus saulės galios srautui, didžiausios galios taško sekimo algoritmas sugeba greitai prisitaikyti. Kai saulės galios srautas mažėja apkrovos varža R didinama, kai saulės galios srautas didėja – R mažinama. Esant nusistovėjusiam ir beveik nekintančiam saulės galios srautui, *IncCond* algoritmas nesusieja aptikti tikslaus didžiausios galios taško ir svyruoja aplink jį. Tai yra todėl, kad apkrovos varžos keitimo žingsnis valdymo algoritme yra didelis. Šis trūkumas turi ypatingai didelę įtaką fotovoltinės jėgainės našumui, kai saulės galios srautas yra didelis. Dėl netikslaus didžiausios galios taško sekimo galios svyravimai jėgainės išėjime siekia 14 %.



3.5 pav. 33 min trukmės saulės galios srauto, apkrovos varžos ir generuojamos elektros galios kitimo laike fragmentas gautas imitacinių skaičiavimų metu, kai apkrovos keitimo žingsnis $\Delta R = 0,05 \Omega$

Fig. 3.5 Simulation of solar power flux, load resistance and generated power in 33 min calculation, when changing step of load resistance is $\Delta R = 0.05 \Omega$

Siekiant sumažinti didelį galios svyravimą aplink didžiausios galios tašką ir padidinti fotovoltinės jėgainės našumą, apkrovos varžos keitimo žingsnis ΔR

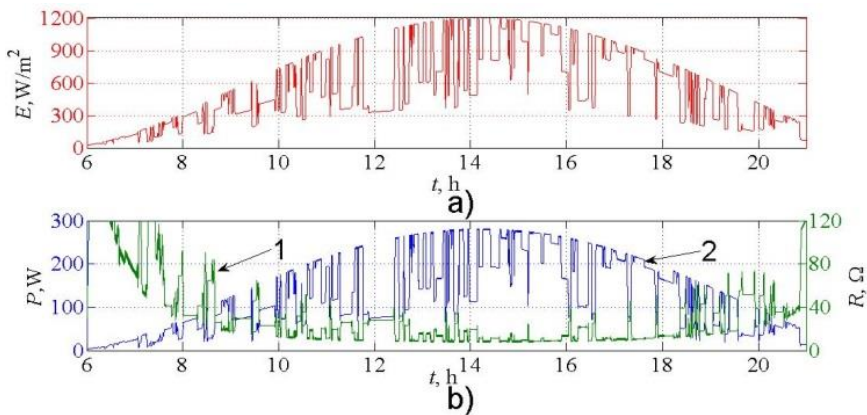
buvo sumažintas iki $0,05 \Omega$ (3.5 pav.). Jėgainės veikimo režimą apibūdinantys grafikai pateikti B.2 priede. Esant mažam apkrovos keitimo žingsniui algoritmas sugeba tiksliai aptikti didžiausios galios tašką ir tiksliai reaguoja net į mažą saulės galios srauto pasikeitimą.

Mažo apkrovos keitimo žingsnio trūkumas išryškėja, kai saulės galios srautas pradeda keistis greičiau. 3.5 paveiksle matyti, jog saulės galios srautui per 1 min sumažėjus 700 W/m^2 , algoritmas pasiekia naują nusistovėjusį didžiausios galios tašką per 3 min. Tai reiškia, jog 2 minutes modulis veikia su neoptimalia apkrovos varža ir dėl to prarandama elektros energija. Pateiktame grafike matyti, kad dėl per mažo žingsnio ΔR sistema nespėja laiku pasiekti reikiamo didžiausios galios taško, todėl fotovoltinio modulio sukuriama elektros galia sumažėja iki 24 %.

Detalesni tyrimai parodė, kad nustatyti optimalų apkrovos keitimo žingsnį yra itin sudėtinga, nes esant greitai besikeičiančiam saulės galios srautui efektyviau algoritmas veikia, kai apkrovos keitimo žingsnis yra didesnis. Tačiau sekant mažai debesuotai dienai, kai saulės galios srautas kinta lėtai, efektyviau naudoti mažą apkrovos keitimo žingsnį ir tiksliai aptikti didžiausios galios tašką.

3.3. Fotovoltinės jėgainės tyrimas esant kintančiam saulės galios srautui

Šešėlių įtakos tyrimui sudarytas fotovoltinės jėgainės modelis su trimis fotovoltiniais moduliais, kurių kiekvieno nominali galia yra 90 W. Tyrimo metu buvo keičiamas apkrovos keitimo žingsnis ΔR ir surasta optimali apkrovos varžos keitimo žingsnio vertė, kuriai esant algoritmas greičiausiai ir tiksliausiai pasiekia didžiausios galios tašką. Surastoji apkrovos varžos vertė $\Delta R = 0,7 \Omega$. 3.6 pav. pateiktos charakteristikos apibūdinančios fotovoltinės jėgainės darbą šviesiuoju paros laiku rugpjūčio 14 d., kai visi 3 fotovoltiniai moduliai veikia vienodomis aplinkos sąlygomis. Tyrimo metu imituotas 15 valandų trukmės greitai besikeičiantis saulės galios srauto signalas pavaizduotas 3.6 paveiksle (a). 3.6 paveiksle (b) pateiktas skaičiavimo metu valdymo algoritmo parinktos apkrovos varžos kitimas (1 kreivė) ir fotovoltinės jėgainės gaminamos elektros energijos galios kitimas atitinkamu laiko momentu (2 kreivė).

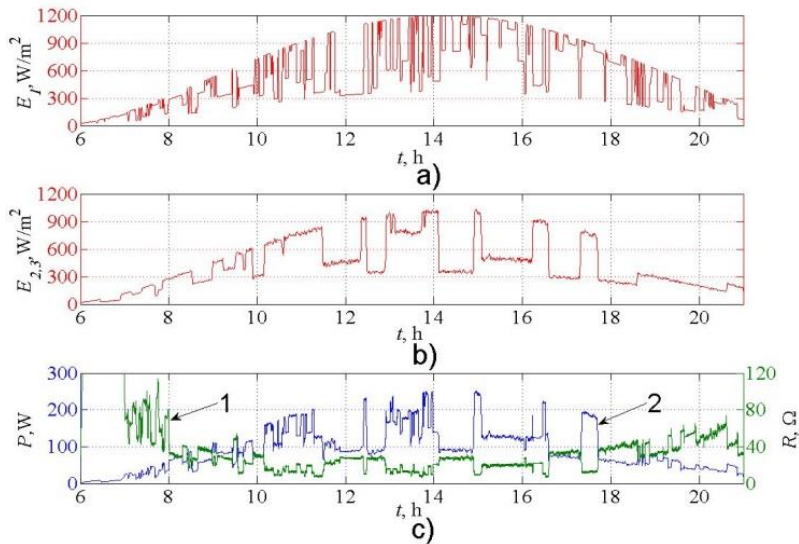


3.6 pav. Imituoto saulės galios srauto kitimas (a) ir didėjančio laidžio algoritmo parinktos apkrovos varžos bei fotovoltinės jėgainės gaminamos elektros energijos galios priklausomybės (b) šviesiuoju paros metu esant vienodam modulių apšvietimui.

Fig. 3.6. Simulated solar power flux (a) and load resistance set by Incremental Conductance algorithm and the power at the output of solar power plant (b) during day time, when solar power flux is the same on all photovoltaic modules.

Pateiktuose grafikuose matyti, kad algoritmas ne visada spėja pasiekti optimalią apkrovą. Tačiau, kai aplinkos sąlygos nusistovi, algoritmas tiksliai aptinka DGT.

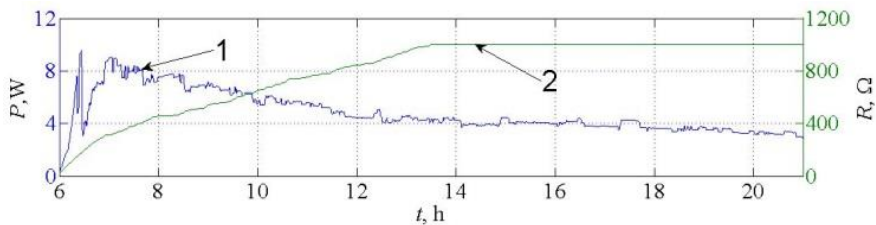
Tolimesnių tyrimų metu buvo imituotos sąlygos, kai atskirus fotovoltinės jėgainės modulius veikia skirtingas saulės galios srauto signalas – į pirmojo fotovoltinio modulio paviršių patenkantis saulės galios srauto signalas E_1 pateiktas 3.7 paveiksle (a), į likusius du fotovoltinius modulius patenkantis saulės galios srauto signalas $E_{2,3}$ pateiktas 3.7 paveiksle (b). Esant 3.7 paveiksle (a) ir (b) nurodytoms sąlygoms buvo apskaičiuota, kad fotovoltinė jėgainė, kurioje sumontuoti fotovoltiniai moduliai turintys apėjimo diodus šviesiuoju paros laiku pagamina 1,92 kW/h elektros energijos. Kai apėjimo diodų nėra fotovoltinė jėgainė pagamina 1,73 kW/h elektros energijos. Tai rodo, kad neesant apėjimo diodų valdymo algoritmas buvo netinkamai parinkęs didžiausios galios tašką – jėgainė dirbo mažiau apšviesto modulio režimu.



3.7 pav. Imituoto saulės galios srauto signalo kitimas (a), (b) ir IncCond algoritmo parinktos apkrovos varžos bei saulės jėgainės gaminamos elektros energijos galios priklausomybės (c) šviesiuoju paros metu esant šešėliui.

Fig. 3.7. Simulated signal of solar power flux (a), (b) and load resistance, set by IncCond algorithm and the power at the output of solar power plant (b) during day time, when there are shadows on separated photovoltaic modules.

Atliekant bandymus pastebėta, kad esant mažam apkrovos keitimo žingsniui DGT sekimo algoritmas neteisingai pasirenka didžiausios galios taško kryptį ir jo pasiekti nesugeba (užstringa) (3.8 pav.). Tai rodo, kad algoritmas aptikęs lokalų didžiausios galios tašką, neranda iš jo išėjimo.



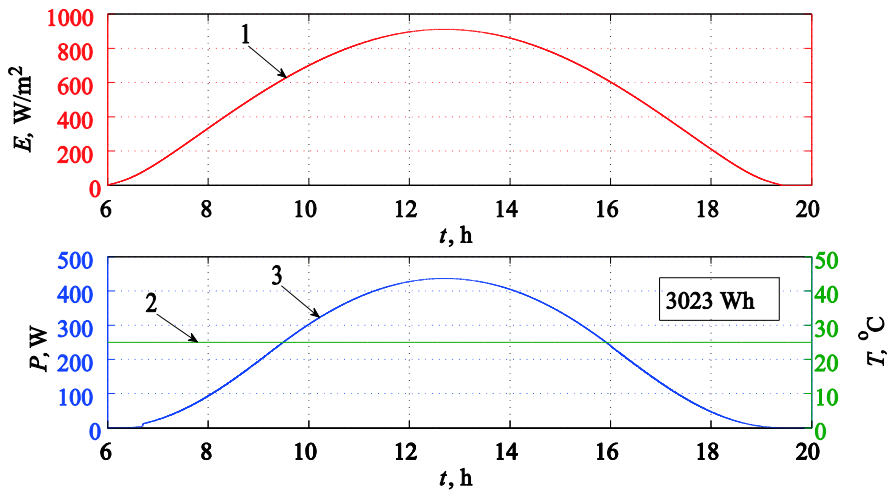
3.8 pav. IncCond algoritmo parinktos apkrovos varžos ir saulės jėgainės gaminamos elektros energijos galios priklausomybės, kai algoritmas pasilieka lokaliame didžiausios galios taške

Fig. 3.8. Load resistance, set by IncCond algorithm and power of the solar power plant when the algorithm is stuck in the local maximum power point

Neteisingai parinkus didžiausios galios tašką, sekimo algoritmas negali pasiekti didžiausios galios ir dalis saulės energijos lieka nepanaudota. Dienos metu saulės jėgainėse gaunamos elektros energijos galios skirtumas globaliame ir lokaliame DGT siekia 45 %.

3.4. Fotovoltinės jėgainės tyrimas tolygiai kintant saulės galios srautui ir palaikant fotovoltinių modulių temperatūrą nekintančią

Bandymų metu buvo imituojama, kad fotovoltinė jėgainė veikia, kai FV modulių temperatūra nekinta ir atitinka standartinę testavimo sąlygų temperatūrą 25 °C (3.9 pav., 2 kreivė). Šiame paveiksle 1 kreivė žymi tolygų saulės galios srauto kitimą šviesiuoju paros laiku nuo 0 iki 900 W/m². 3 kreivė atvaizduoja apskaičiuotą momentinę galią, kurią generuoja valdiklio valdoma fotovoltinė jėgainė.



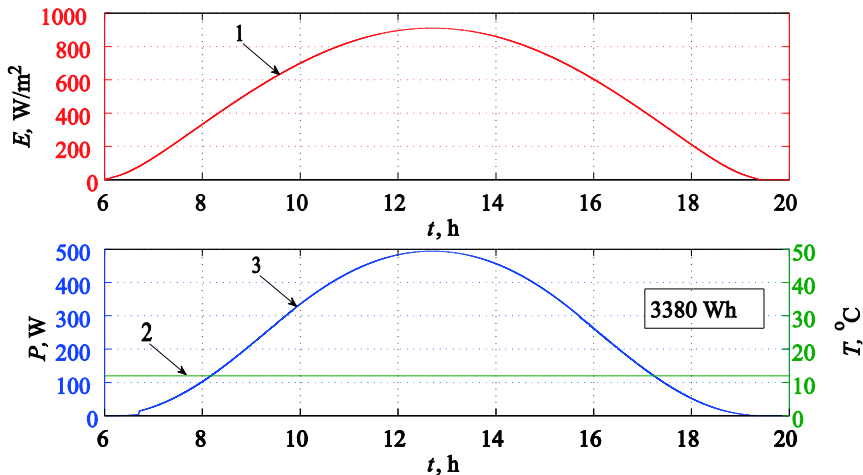
3.9 pav. Charakteristikos apibūdinančios saulės jėgainės darbą giedrą dieną, kai modulių temperatūra nekinta ir lygi 25 °C: 1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – modulių temperatūra saulės jėgainės veikimo metu; 3 – momentinė saulės jėgainės galia atitinkamu laiko momentu.

Fig. 3.9. Solar power plant operating characteristic on a bright day, when photovoltaic module temperature is 25 °C and constant: 1 – curve of solar irradiance S_T ; 2 – curve of photovoltaic module temperature; 3 – power at the output of solar power plant.

Iš galios charakteristikos atvaizduotos 3.9 paveiksle 3 kreivė paveiksle matyti, kad esant tolygiam saulės galios srauto kitimui ir pastoviai 25 °C temperatūrai, valdiklis be nukrypimų sugeba sekti DGT. Esant šioms sąlygoms fotovoltinė jėgainė pagamina 3023 Wh elektros energijos.

3.10 paveiksle pateikti antrojo bandymo rezultatai, kai imituojamas fotovoltinės jėgainės veikimas, esant nekintančiai FV modulių temperatūrai 12 °C (2 kreivė). Šiame paveiksle saulės galios srauto kitimą žymi 1 kreivė. Ji yra tokia pati kaip ir pirmojo bandymo metu. 3 kreivė 5 paveiksle vaizduoja momentinę galią, kurią generuoja fotovoltinė jėgainė. Taigi esant tokiam pačiam saulės galios srautui kaip ir pirmojo bandymo metu, jėgainė pagamina 3380 Wh elektros energijos.

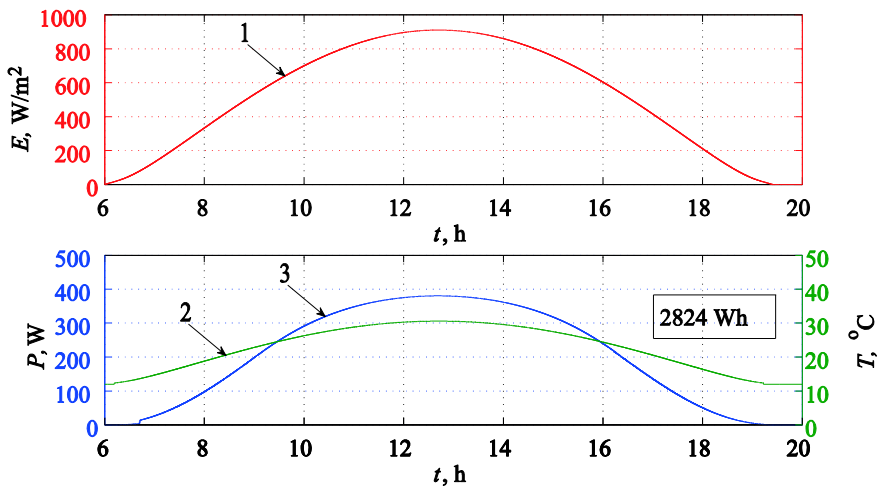
Lyginant 3.9 ir 3.10 paveiksluose galios charakteristikas matyti, kad fotovoltinė jėgainė daugiau elektros energijos pagamina, kai FV modulių temperatūra yra žemesnė. Matyti, kad esant FV modulių temperatūrai žemesnei 13 °C, fotovoltinė jėgainė gali pagaminti 357 Wh elektros energijos daugiau. Tai gi rekomenduojama esant galimybei aušinti fotovoltinius modulius.



3.10 pav. Charakteristikos apibūdinančios saulės jėgainės darbą giedrą dieną, kai modulių temperatūra nekinta ir lygi 12 °C: 1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – modulių temperatūra saulės jėgainės veikimo metu; 3 – momentinė saulės jėgainės galia atitinkamu laiko momentu.

Fig. 3.10. Solar power plant operating characteristic during the bright day, when photovoltaic module temperature is 12 °C and constant: 1 – curve of solar irradiance S_T ; 2 – curve of photovoltaic module temperature; 3 – power at the output of solar power plant.

Sekančio bandymo metu imituojama, kad fotovoltinių modulių temperatūra tolygiai kinta. Tai būdinga giedrai dienai – intensyvėjant saulės SGS didėja modulio temperatūra. 3.11 paveiksle 1 kreivė atvaizduoja SGS kitimą tokiu pat dėsningumu kaip ir ankstesniuose bandymuose. Šiame paveiksle 2 kreivė žymi modulių temperatūros kitimą, atsižvelgiant į saulės galios srauto intensyvumą. 3 kreivė atvaizduoja apskaičiuotą momentinę fotovoltinės jėgainės galią esant atitinkamoms aplinkos sąlygoms laiko momentu t .



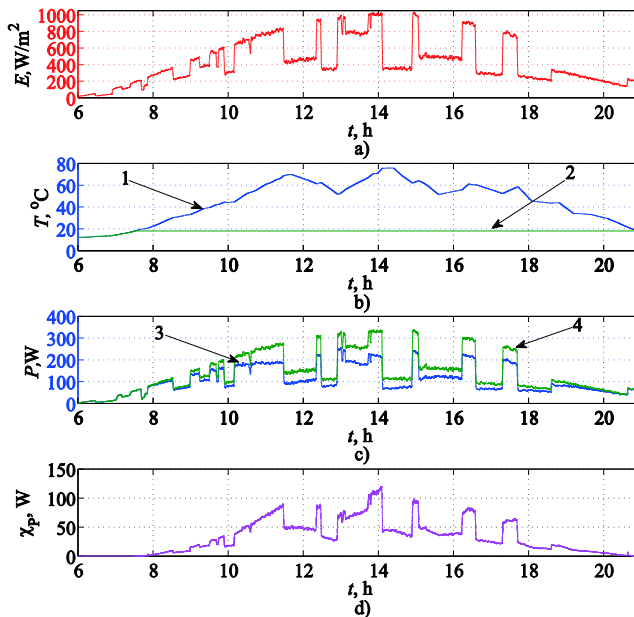
3.11 pav. Charakteristikos apibūdinančios saulės jėgainės darbą giedrą dieną, kai modulių temperatūra kinta priklausomai nuo saulės galios srauto intensyvumo: 1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – modulių temperatūra saulės jėgainės veikimo metu; 3 – momentinė saulės jėgainės galia atitinkamu laiko momentu.

Fig. 3.11. Solar power plant operating characteristic during the bright day, when photovoltaic module temperature is changing depending on solar irradiance: 1 – curve of solar irradiance S_T ; 2 – curve of photovoltaic module temperature; 3 – power at the output of solar power plant.

Paskaičiuota, kad fotovoltinė jėgainė per 14 val. pagamins 2824 Wh elektros energijos. Tai yra 199 Wh mažiau nei tuomet, kai FV modulių temperatūra pastovi ir lygi 25 °C ir net 556 Wh mažiau, kai modulių temperatūra visą fotovoltinės jėgainės darbo laiką buvo lygi 12 °C. Visų bandymų metu FV jėgainės valdiklis geba aptikti didžiausią galios tašką ir jį sekti. Galima teigti, kad tolygus FV modulių temperatūros kitimas neturi įtakos fotovoltinės jėgainės valdymo algoritmui, tačiau turi didelę įtaką FV modulių efektyvumui.

3.5. Fotovoltinės jėgainės tyrimas chaotiškai kintant saulės galios srautui ir fotovoltinių modulių temperatūrai

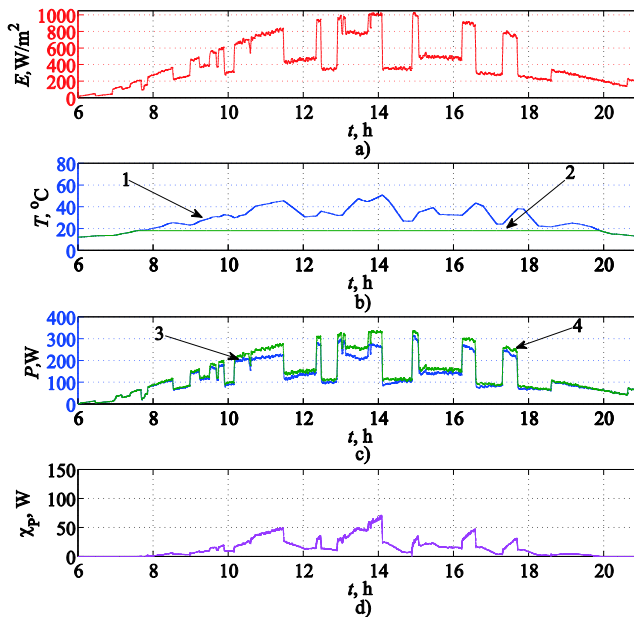
Tyrimo metu atskiri bandymai, imitavo įvairias aplinkos sąlygas. Pirmuoju bandymu buvo imituojama, kad modulių temperatūra kinta lėtai ir atskirais laiko momentais įkaista iki 75°C . Tai būdinga mažai debesuotą dieną, kai vėjas silpnas. Intensyvėjant saulės galios srautui didėja fotovoltinio modulio temperatūra.



3.12 pav. Charakteristikos apibūdinančios saulės galios srautą (a), modulio temperatūrą mažai vėjuotą dieną (b-1), modulio temperatūrą palaikant ne aukštesnę kaip 18°C (b-2), momentinę galią, kurią generuoja fotovoltinių modulių jėgainė be priverstinio aušinimo (c-3), momentinę galią, kurią generuoja fotovoltinių modulių jėgainė modulių temperatūrą palaikant ne aukštesnę kaip 18°C (c-4), generuojamą momentinės galios skirtumą (d).

Fig. 3.12. Solar power flux (a), temperature of PV modules during a slightly windy day without forced cooling (b-1), temperature of PV modules during a slightly windy day with forced cooling to 18°C (b-2), instantaneous power of solar power plant without forced cooling (c-3), instantaneous power of solar power plant with forced cooling to 18°C (c-4), instantaneous difference of output power (d).

SGS kitimas atvaizduotas 3.12 paveiksle a dalyje, imituoja šviesų paros laiką, kai SGS kinta nuo 0 iki 1000 W/m^2 . 3.12 paveiksle b dalyje 1 kreivė žymi FV modulių temperatūros kitimą, atsižvelgiant į saulės galios srauto intensyvumą, o 2 kreivė žymi FV modulių temperatūrą, kai ji palaikoma ne didesnė nei 18°C . Iš šios kreivės matome, kad fotovoltiniai moduliai pradeda aušinti jiems įkaitus 18°C ir didesnės temperatūros. Kai FV modulių temperatūra nukrenta mažiau 18°C – priverstinis aušinimas yra išjungiamas. 3.12 paveiksle c dalyje 3 kreivė atvaizduoja apskaičiuotą momentinę jėgainės galią laiko momentu t , kai moduliai nėra aušinami. 4 kreivė atvaizduoja apskaičiuotą momentinę jėgainės galią laiko momentu t , kai modulių temperatūra yra palaikoma ne didesnė kaip 18°C . 3.12 pav. d dalyje esanti kreivė atvaizduoja momentinį galios skirtumą, kai fotovoltiniai moduliai yra aušinami ir neaušinami.



3.13 pav. Charakteristikos apibūdinančios saulės galios srautą (a), modulio temperatūrą labai vėjuotą dieną (b-1), modulio temperatūrą palaikant ne aukštesnę kaip 18°C (b-2), momentinę galią, kurią generuoja fotovoltinių modulių jėgainė be priverstinio aušinimo (c-3), momentinę galią, kurią generuoja fotovoltinių modulių jėgainė modulio temperatūrą palaikant ne aukštesnę kaip 18°C (c-4), generuojamą momentinės galios skirtumą (d).

Fig. 3.13. Solar power flux (a), temperature of PV modules during windy day without forced cooling (b-1), temperature of PV modules during windy day with forced cooling to 18°C (b-2), instantaneous power of solar power plant without forced cooling (c-3), instantaneous power of solar power plant with forced cooling to 18°C (c-4), instantaneous difference of output power (d).

Kai fotovoltinių modulių temperatūros kinta lėtai, jėgainė per 15 val. šviesaus paros laiko pagamina 1558 Wh elektros energijos. Esant tokioms pačioms aplinkos sąlygoms, tačiau FV modulių temperatūrą palaikant ne didesnę kaip 18°C, jėgainė pagamina 2051 Wh elektros energijos.

Sekančio bandymo metu imituojama, kad fotovoltinių modulių temperatūra kinta greičiau ir atskirais laiko momentais įkaista tik iki 50°C. Toks temperatūros kitimas būdingas vėjuotą dieną, kai vėjo stiprumas atskirais laiko momentais kinta skirtingai. Tokiu būdu fotovoltinių modulių temperatūra keičiasi greičiau ir dėl esančio vėjo nespėja labai įkaisti. 3.13 pav. a dalyje esanti kreivė atvaizduoja SGS kitimą tokiu pat dėsningumu kaip ir ankstesniame bandyme. 3.13 pav. b dalyje 1 kreivė žymi fotovoltinių modulių temperatūros kitimą, atsižvelgiant į saulės galios srauto intensyvumą stipriai vėjuotą dieną. 2 kreivė žymi FV modulių temperatūrą, kai ji palaikoma ne didesnė nei 18 °C – ji tokia pati kaip ir pirmojo bandymo metu. Šiuo atveju fotovoltiniai moduliai pradedami aušinti jiems pasiekus 18 °C ir didesnę temperatūrą. Kai FV modulių temperatūra nukrenta mažiau 18 °C – priverstinis aušinimas yra išjungiamas. 3.13 pav. c dalyje 3 kreivė atvaizduoja apskaičiuotą momentinę fotovoltinės jėgainės galią laiko momentu t , kurią generuoja valdiklio valdoma fotovoltinė jėgainė, kai modulių temperatūra yra nepalaikoma. 4 kreivė atvaizduoja apskaičiuotą momentinę fotovoltinės jėgainės galią laiko momentu t , kai FV modulių temperatūra yra palaikoma ne didesnė kaip 18°C. 3.13 pav. d dalyje esanti kreivė atvaizduoja momentinį galios skirtumą, kai fotovoltiniai moduliai yra aušinami ir neaušinami.

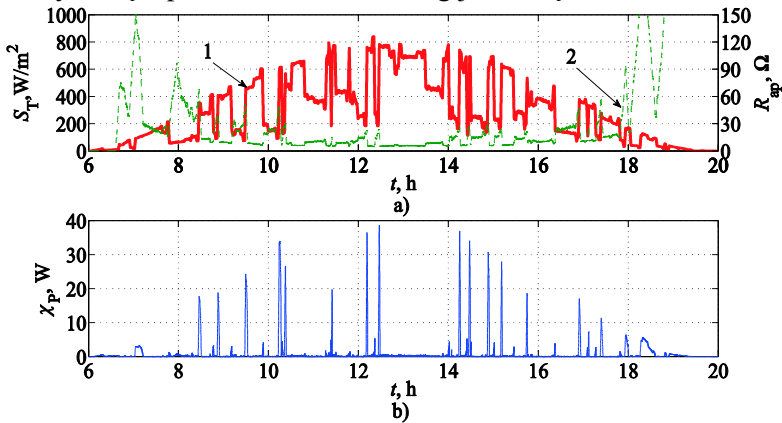
Kai fotovoltinėje jėgainėje modulių temperatūra kinta greitai, tačiau moduliai nespėja labai įkaisti, fotovoltinė jėgainė per 15 val. šviesaus paros laiko pagamina 1822 Wh elektros energijos. Esant tokioms pačioms aplinkos sąlygoms, tačiau modulių temperatūrą palaikant ne didesnę kaip 18 °C, fotovoltinė jėgainė pagamina 2029 Wh elektros energijos.

Tai gi tyrimais įrodyta, kad esant tokiam pačiam SGS fotovoltinė jėgainė per 15 val. pagamina 264 Wh elektros energijos mažiau, kai modulių temperatūra kito lėtai ir įkaisdavo iki 75 °C. Fotovoltinė jėgainė geba generuoti 492 Wh elektros energijos daugiau esant modulių aušinimui, mažai vėjuotą dieną ir 207 Wh daugiau esant aušinimui labai vėjuotą dieną.

3.6. Dirbtinių neuronų tinklų įtaka fotovoltinės jėgainės našumui

Fotovoltinės jėgainės darbo efektyvumui tirti, esant skirtingiems fotovoltinių modulių darbo režimams, buvo generuojamas chaotiškai kintantis saulės galios signalas, imituojantis debesų šešėliavimą.

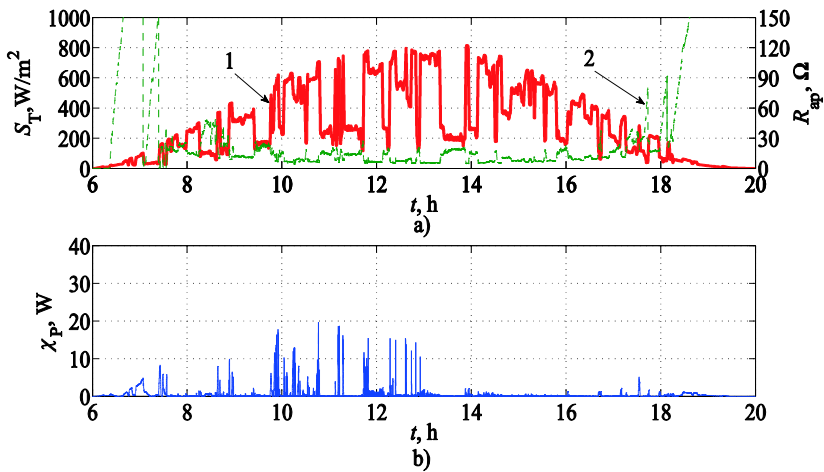
3.14 pav. pateiktas fotovoltinės jėgainės darbą apibūdinančios charakteristikos, kai didžiausios galios taškas sekamas tik *IncCond* algoritmu. 3.14 pav. a dalyje pateiktas saulės galios srautas S_{PM} , kai imituojant lėtai slenkančius debesis sukuriamos lėtai besikeičiančios aplinkos sąlygos (1 kreivė) ir jėgainės valdiklio parinktos apkrovos R_{ap} vertės atitinkamu laiko momentu (2 kreivė). 3.14 pav. b dalyje pateikta charakteristika, vaizduoja valdiklio valdomo *IncCond* algoritmu gaminamos galios skirtumą nuo teorinės idealios galios, atitinkamu laiko momentu. Ši charakteristika atvaizduoja fotovoltinės jėgainės darbo efektyvumą – prarastos elektros energijos kiekį.



3.14 pav. Charakteristikos apibūdinančios fotovoltinės jėgainės darbą debesuotą dieną su lėtai slenkančiais debesimis, kai didžiausios galios taškas sekamas tik didėjančio laidžio algoritmu: 1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – didėjančio laidžio algoritmo parinktos apkrovos varžos R_{ap} verčių kreivė; 3 – iš fotovoltinio modulio paimtos energijos neatitikimas χ_p lyginant su atveju, kai apkrovos varža idealiai atitinka didžiausios galios tašką.

Fig. 3.14. Characteristics of maximum power point tracking, is using *Incremental Conductance* algorithm during the cloudy day and clouds are moving slowly: 1 – solar radiation S_T curve during daylight time; 2 – load resistance R_{ap} curve of using *Incremental Conductance* algorithm; 3 – χ_p difference between actual power and maximum power with ideal load resistance.

Iš 3.14 pav. matyti, kad DGT sekimo algoritmas aptinka didžiausios galios tašką tik tuomet, kai saulės galios srautas keičiasi lėtai. Kai saulės galios srautas keičiasi greitai, DGT algoritmas nesugeba per trumpą laiką sumažinti arba padidinti apkrovą. Todėl priartėjimo prie didžiausios galios taško metu yra prarandama dalis elektros energijos. Greitesniam DGT aptikimui naudojamas savaime besimokantis dirbtinių neuronų tinklas.

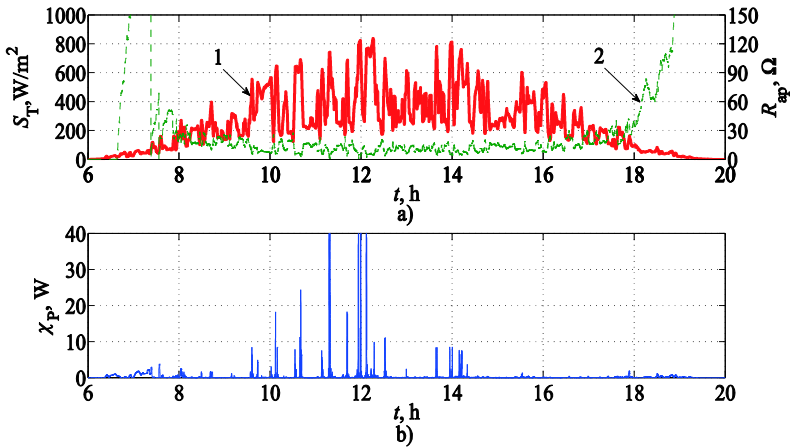


3.15 pav. Charakteristikos apibūdinančios fotovoltinės jėgainės darbą debesuotą dieną su lėtai slenkančiais debesimis, kai didžiausios galios taškas sekamas dirbtinių neuronų tinklu ir didėjančio laidžio algoritmu: 1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – dirbtinių neuronų tinklo ir didėjančio laidžio algoritmo parinktos apkrovos varžos R_{ap} verčių kreivė; 3 – iš fotovoltinio modulio paimtos energijos neatitikimas χ_p lyginant su atveju, kai apkrovos varža idealiai atitinka didžiausios galios tašką.

Fig. 3.15. Characteristics of maximum power point tracking, is using artificial neural network and *Incremental Conductance* algorithm during the cloudy day and clouds are moving slowly: 1 – solar radiation S_T curve during daylight time; 2 – load resistance R_{ap} curve of using artificial neural network and *Incremental Conductance* algorithm; 3 – χ_p difference between actual power and maximum power with ideal load resistance.

Fotovoltinės jėgainės darbą apibūdinančios charakteristikos, kai didžiausios galios taškas sekamas *IncCond* algoritmu ir dirbtinių neuronų tinklu, pateiktas 3.15 pav.

3.15 pav. b dalyje 3 kreivė rodo, kad didžiausi energijos nuostoliai gautami laikotarpyje iki 13:00 val. Šį laikotarpį didžiąją laiko dalį valdo *IncCond* algoritmas, nes DNT yra ne pakankamai apmokytas aptikti didžiausią galios tašką. Kai dirbtinių neuronų tinklas yra pakankamai apmokytas tik jis vienas pradeda valdyti valdiklį. Tai atitinka kreives nuo 13:00 val. Šiuo laikotarpiu apkrovos varža parenkama artima idealiai, o energijos praradimai yra artimi nuliui. Be to, laikotarpyje iki 13 val., kai valdiklį valdė *IncCond* algoritmas ir DNT, kuris tuo metu dar buvo mokomas energijos praradimai buvo ženkliai mažesni. Galios skirtumas nesiekė 20 W.



3.16 pav. Charakteristikos apibūdinančios fotovoltinės jėgainės darbą debesuotą dieną su greitai slenkančiais debesimis, kai didžiausios galios taškas sekamas dirbtinių neuronų tinklu ir didėjančio laidžio algoritmu: 1 – saulės galios srauto S_T kitimo šviesiuoju paros metu kreivė; 2 – dirbtinių neuronų tinklo ir didėjančio laidžio algoritmo parinktos apkrovos varžos R_{ap} verčių kreivė; 3 – iš fotovoltinio modulio paimtos energijos neatitikimas χ_p lyginant su atveju, kai apkrovos varža idealiai atitinka didžiausios galios tašką.

Fig. 3.16. Characteristics of maximum power point tracking, when there is using artificial neural network and *Incremental Conductance* algorithm during the cloudy day and clouds are moving fast: 1 – solar radiation S_T curve during daylight time; 2 – load resistance R_{ap} curve of using artificial neural network and *Incremental Conductance* algorithm; 3 – χ_p difference between actual power and maximum power with ideal load resistance.

3.16 pav. pateiktos saulės jėgainės darbą apibūdinančios charakteristikos, kai didžiausios galios taškas sekamas *IncCond* algoritmu ir dirbtinių neuronų tinklu, debesuotą dieną su greitai slenkančiais debesimis. Iš 3.16 pav. grafikų matyti, kad dirbtinių neuronų tinklas apmokomas viena valanda ilgiau – valdiklio valdymą jis perima apie 14:00 val. Laikotarpyje iki 14 val., kai valdiklį valdė *IncCond* algoritmas ir DNT, kuris tuo metu dar buvo mokomas, energijos praradimai buvo nedideli – elektros energijos praradimai tik keletą kartų viršijo 20 W.

3.3 lentelė. Elektros energijos kiekis pagamintas per 15 valandų**Table 3.3.** Amount of produced electricity during 15 hours

| Bandy- mo nr. | Apkro- vos kei- timo žingsnis ΔR (Ω) | Vėjo greitis (m/s) | Tempe- ratūra ($^{\circ}\text{C}$) | DGT seki- mas Inc- Cond algo- ritmu (kWh) | DGT seki- mas Inc- Cond ir DNT algo- ritmu (kWh) | Pagamin- tos ener- gijos skir- tumas (kWh) | Pagamin- tos ener- gijos skir- tumas (%) |
|---------------------|---|--------------------------|--|--|--|--|---|
| 1 | 0,05 | 0 | 10 | 3,459 | 3,656 | 0,197 | 5,39 |
| 2 | 2,00 | 0 | 10 | 2,969 | 3,192 | 0,223 | 6,99 |
| 3 | 0,05 | 0 | 25 | 3,159 | 3,356 | 0,197 | 5,87 |
| 4 | 2,00 | 0 | 25 | 3,007 | 3,147 | 0,140 | 4,45 |
| 5 | 0,05 | 0 | 50 | 2,687 | 2,846 | 0,159 | 5,59 |
| 6 | 2,00 | 0 | 50 | 2,587 | 2,775 | 0,188 | 6,77 |
| 7 | 0,05 | 0 | 75 | 2,367 | 2,538 | 0,171 | 6,74 |
| 8 | 2,00 | 0 | 75 | 2,198 | 2,378 | 0,180 | 7,57 |
| 9 | 0,01 | 4,0 | 10–75 | 2,857 | 3,356 | 0,499 | 14,87 |
| 10 | 0,05 | 4,0 | 10–75 | 2,894 | 3,287 | 0,393 | 11,96 |
| 11 | 0,50 | 4,0 | 10–75 | 2,957 | 3,356 | 0,399 | 11,89 |
| 12 | 1,00 | 4,0 | 10–75 | 3,046 | 3,677 | 0,631 | 17,16 |
| 13 | 1,50 | 4,0 | 10–75 | 3,001 | 3,536 | 0,535 | 15,13 |
| 14 | 2,00 | 4,0 | 10–75 | 2,923 | 3,376 | 0,453 | 13,42 |
| 15 | 2,50 | 4,0 | 10–75 | 2,845 | 3,165 | 0,320 | 10,11 |
| 16 | 3,00 | 4,0 | 10–75 | 2,634 | 2,867 | 0,233 | 8,13 |
| 17 | 0,01 | 9,0 | 10–75 | 3,261 | 3,625 | 0,364 | 10,04 |
| 18 | 0,05 | 9,0 | 10–75 | 3,383 | 3,835 | 0,452 | 11,79 |
| 19 | 0,50 | 9,0 | 10–75 | 3,494 | 3,984 | 0,490 | 12,30 |
| 20 | 1,00 | 9,0 | 10–75 | 3,686 | 4,451 | 0,765 | 17,19 |
| 21 | 1,50 | 9,0 | 10–75 | 3,551 | 4,265 | 0,714 | 16,74 |
| 22 | 2,00 | 9,0 | 10–75 | 3,464 | 4,015 | 0,551 | 13,72 |
| 23 | 2,50 | 9,0 | 10–75 | 3,295 | 3,826 | 0,531 | 13,88 |
| 24 | 3,00 | 9,0 | 10–75 | 3,078 | 3,391 | 0,313 | 9,23 |

3.3 lentelėje pateikti bandymų rezultatai, kai 450 W fotovoltinė jėgainė veikė esant skirtingoms aplinkos sąlygoms, bei buvo naudojami skirtingi didžiausios galios taško sekimo algoritmai. Bandymai atliekami imituojant 15 valandų trukmės šviesų paros laiką. Iš pateiktų duomenų matyti, kad sugeneruotos energijos kiekis valdant fotovoltinę jėgainę skirtingais didžiausios galios taško sekimo algoritmais skiriasi nežymiai, kai modulių temperatūra nekinta. Didžiausios galios taško sekimo su dirbtinių neuronų tinklu privalumas

ypatingai matyti, kai fotovoltinių modulių temperatūra kinta, esant kintančioms aplinkos sąlygoms. Esant tokioms sąlygoms fotovoltinė jėgainė geba sugeneruoti 17 % daugiau elektros energijos ir padidinti jėgainės našumą.

3.7. Trečiojo skyriaus išvados

Atlikus tyrimus fotovoltinės jėgainės našumo didinimo srityje, galima padaryti tokias išvadas:

1. Palyginus imitaciniais skaičiavimais gautas fotovoltinio modulio charakteristikas su tokios pačios galios fotovoltinio modulio eksperimento metu išmatuotomis charakteristikomis, galima teigti, kad sudarytas matematinis modelis imituoja analogiškus fotovoltinius modulius rinkoje ir gali būti naudojamas fotovoltinės jėgainės tyrimui ir jos darbo prognozavimui.
2. Apėjimo diodų panaudojimas fotovoltiniuose moduluose padidina jų efektyvumą beveik 2 kartus. Atsiradus šešėliui ant modulio paviršiaus, dėl apėjimo diodo modulyje susidaro lokalūs ir globalūs didžiausios galios taškai. Dėl šios priežasties fotovoltinės jėgainės valdiklis gali klaidingai parinkti jėgainės darbo režimą viename iš lokalių didžiausios galios taškų ir sukuriama elektros energijos galia gali siekti tik 55 % galios sukuriama esant globaliame didžiausiame galios taške.
3. Palaikant fotovoltinių modulių temperatūrą iki 18 °C ir esant silpnam vėjui jėgainė pagamina 31,5 % daugiau elektros energijos už neaušinamą fotovoltinę jėgainę. Stipriai vėjuotą dieną fotovoltiniai moduliai pagamina apie 11,3 % daugiau elektros energijos.
4. Taikant fotovoltinių jėgainių valdymui intelektualias didžiausios galios sekimo sistemas, grįstas dirbtinių neuronų tinklų taikymu ir veikiančias pagal sukurtus algoritmus, leidžia Lietuvos sąlygomis padidinti 17 % fotovoltinėje jėgainėje pagaminamos elektros energijos kiekį.

Bendrosios išvados

1. Fotovoltinės energetikos plėtrą dotuoja valstybės padidindamos pagamintos elektros energijos supirkimo kainą, kuri laikui bėgant mažinama. Norint palaikyti fotovoltinės energetikos rentabilumą ir sėkmingai plėtoti fotovoltinę energetiką reikia analizuoti ir spręsti fotovoltinės jėgainės efektyvaus valdymo mokslinę problemą. Vienas iš galimų efektyvumo didinimo būdų yra paversti elektros energija maksimalią dalį krintančio saulės energijos srauto.

2. Tiriant fotovoltines jėgaines, analizuojant jų darbo efektyvumą, būtina turėti fotovoltinės jėgainės imitacinį modelį įvertinantį jėgainės struktūrą, veikimo principus ir įgalinantį imituoti įvairias aplinkos sąlygas pasirinktoje pasaulio vietovėje.

3. Sudarytas atskiro fotovoltinio modulio imitacinis modelis, kurio darbo režimą, veikimo charakteristikas galima keisti ir pritaikyti realybėje egzistuojančiam fotovoltinio modulio tipui tirti. Sudarytu modeliu pasirėmus, realios FV jėgainės detalios ištiriamos praktiškai be klaidų.

4. Darbo metu fotovoltinis modulis įkaista ir jo temperatūra pasiekia ir viršija 70 °C. Sudarytas matematinis fotovoltinio modulio temperatūros kitimo modelis leidžia imituoti fotovoltinio modulio įkaitimą. Temperatūros kitimui modelyje įvertinti pasiremiama saulės galios srauto intensyvumu, aplinkos temperatūra ir vėjo greičiu.

5. Siekiant detaliau ištirti vieno iš dažniausiai taikomo praktikoje didžiausios galios taško sekimo algoritmo privalumus ir trūkumus, sudarytas fotovoltinės jėgainės didžiausios galios taško sekimo plačiai naudojamo algoritmo modelis įgyvendintas atskirame programos bloke, kuris leidžia tyrimo metu nesudėtingai keisti bet kuriuos fotovoltinės jėgainės valdymo parametrus.

6. Iš daugelio fotovoltinių modulių sudarytoje jėgainėje dėl debesų ir kitų faktorių susidaro šešėliai, kurie ženkliai sumažina fotovoltinės jėgainės darbo efektyvumą. Efektyvumui padidinti reikia naudoti apėjimo diodus. Fotovoltinės jėgainės su apėjimo diodais galios charakteristikoje susidaro daug lokalių maksimumo taškų, kurie negarantuoja didelio jėgainės darbo efektyvumo. Panaudojus dirbtinių neuronų tinklą modelyje sudarytas atskiras didžiausios galios taško sekimo algoritmo blokas leidžia išvengti jėgainės darbo lokaliuose maksimumuose režimus, greičiau ir tiksliau sekti didžiausios galios tašką, padidinti fotovoltinės jėgainės našumą.

7. Sudarytas bendras fotovoltinės jėgainės matematinis modelis, kuris leidžia tirti įvairios galios jėgaines. Tyrimų metu modelyje galima imituoti įvairias jėgainės veikimo sąlygas, imituojuant kintantį saulės galios srautą, modulio temperatūrą, bei naudojant skirtingus didžiausios galios taško sekimo algoritmus. Eksperimentiniais tyrimais įrodyta, kad sudarytas fotovoltinės jėgainės modelis yra tinkamas fotovoltinių jėgainių tyrimui, jų darbo efektyvumo prognozavimui ir jų valdymui. Sudaryto matematinio modelio didžiausia nuokrypa neviršija 1,7 %.

8. Imitaciniais skaičiavimais įrodyta, kad fotovoltinės jėgainės našumas stipriai įtakojamas besikeičiančio saulės galios srauto, todėl panaudojus dirbtinių neuronų tinklą didžiausiam fotovoltinės jėgainės efektyvumui pasiekti, sukurtas greitas ir tikslus apkrovos priderinimo metodas.

9. Taikant fotovoltinių jėgainių valdymui intelektualias didžiausios galios sekimo sistemas, grįstas dirbtinių neuronų tinklų taikymu ir veikiančias pagal sukurtus algoritmus, pagamintos elektros energijos kiekis fotovoltinėje jėgainėje Lietuvos sąlygomis gali būti padidintas 17 %.

10. Priverstinai aušinant realiomis eksploatacinėmis sąlygomis veikiančius fotovoltinius modulius pagaminamos elektros energijos kiekis fotovoltinėje jėgainėje Lietuvos sąlygomis gali būti padidintas iki 31 %.

Literatūra ir šaltiniai

Abdallah, Z.; Pierre, P.; Jean, P. S.; Jean, P. C.; Michel, A.; DellaKrachai, M.; Belarbi, A.O. 2010. Simulation of Photovoltaic Generators and Comparison of two common Maximum Power Point trackers, in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)* 23–25th March, Spain.

Adel, El S. 2010. PV Cell Module Modeling & ANN Simulation For Smart Grid Applications, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*: 9–20.

Ahmed, M. A.; Almoataz, Y. A.; Raihan, S. J. 2014. Implementation Of Perturb And Observe Mppt Of PV System With Direct Control Method Using Buck And Buck-Boost Converters, *Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering: An international Journal* 1(1): 31–44.

A. Hunter, F.; Mark, W. D.; Brian, P. D.; David, L. K.; William, E. B.; Jay A. K. 2006. Comparison of Photovoltaic Module Performance Measurements, *Journal of Solar Energy Engineering* 128: 152–159.

Akram, B.; Paul, H.; Aaron, K.; Gregg, M. G.; Alec, A. T.; Peidong, Y. 2011. Efficiency enhancement of copper contaminated radial p-n junction solar cells, *Chemical Physics Letters* 501: 153–158.

Ali, C.; Omar, B. H.; Bencherif, M. 2012. Improvement of the “Perturb and Observe” MPPT Algorithm in a Photovoltaic System under Rapidly Changing Climatic Conditions, *International Journal of Computer Applications* 56(12): 5–10.

Altas, I. H.; Sharaf, A.M. 2007. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment, *IEEE*. 341–345.

Amarnath, K.; Suresh, R. 2013. Simulation Of Incremental Conductance Mppt With Direct Control Method Using Cuk Converter, *International Journal of Research in Engineering and Technology* 2(9): 557–566.

Anmol, R. S.; Shyam, M. G. 2014. Performance Analysis of P&O and Incremental Conductance MPPT Algorithms Under Rapidly Changing Weather Conditions, *Journal Electrical Systems* 10(3): 292–304.

Armstrong, S.; Hurley, W. G. 2010. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions, *Applied Thermal Engineering* 30: 1488–1495.

Basim, A. A.; Samer, Y. A.; Ja'far, S. J.; Muhammad, H. D. 2013. Partial Shading of PV System Simulation with Experimental Results, *Smart Grid and Renewable Energy* 4: 429–435.

Baškys, A.; Bleizgys, V.; Gobis V. 2009. The impact of output voltage modulation strategies on power losses in inverter, *Elektronika ir elektrotechnika* 6(94): 47–50.

Bukauskas, V.; Kaciulis, S.; Mezzi, A.; Mironas, A.; Niaura, G.; Rudzikas, M.; Šimkienė, I.; Šetkus, A. 2015. Effect of substrate temperature on the arrangement of ultra-thin TiO₂ films grown by a dc-magnetron sputtering deposition, *Thin Solid Films*, 585: 5–12.

Carvalho, P. C. M.; Pontes, R. S. T.; Oliveira, D. S.; Riffel, D. B.; Oliveira, R. G. V.; Mesquita, S. B. 2004. Control method of a photovoltaic powered reverse osmosis plant without batteries based on maximum power point tracking, *Proc. IEEE/PES Transmiss. Distrib. Conf. Expo.: Latin America*. 137–142.

Chaouachi, A.; Kamel, R.M.; Ichikawa, R.; Hayashi, H.; Nagasaka, K. 2009. Neural Network Ensemble-based Solar Power Generation Short-Term Forecasting, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 54-59.

Cupertino, A. F.; Resende, J. T.; Silveira, B. M.; Vilela, A. O. R.; Pereira, H. A. 2012. A Contribution to Isolated and Grid-Connected Photovoltaic Systems under Shadow Conditions, in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)* March 28-30, 2012 Spain. 6 p.

Díaz-Dorado, E.; Suárez-García, A.; Carrillo C.; Cidrás J. 2010. Influence of the shadows in photovoltaic systems with different configurations of bypass diodes, *Revue des Energies Renouvelables* 11(1): 95–106.

Divya, T. R. C.; Raghavendar, I. 2012. Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter, *International Journal of Modern Engineering Research* 2(6): 4491–4496.

Dobrzański, L. A.; Drygała, A.; Januszka, A. 2009. Formation of photovoltaic modules based on polycrystalline solar cells, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2(37): 607–616.

Dominique, B.; Zacharie K.; Donatien, N. 2013. Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in MATLAB, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 3(3): 493–502.

Engin, K.; Mutlu, B.; Metin, C. 2007. Development of a suitable model for characterizing photovoltaic arrays with shaded solar cells, *Solar Energy* 81: 977–992.

Fadi, N. S. 2014. Modelling and Output Power Evaluation of Series-Parallel Photovoltaic Modules, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 5(1): 129–136.

Farret, F. A.; Simoes, M. G. 2006. *Integration of Alternative Sources of Energy*. 504 p.

Giuseppe, M. T.; Notton, G. 2010. Thermal Models for Photovoltaic Modules in the BIPV applications, *Researchgate*, 2010. 5 p.

Hairul, N. Z.; Saad, M. 2010. Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems, *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10)*, Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010. 750–755.

Hamrouni, N.; Jraidi, M.; Chérif, A. 2008. Solar radiation and ambient temperature effects on the performances of a PV pumping system, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering* 8(9): 1340–1344.

Hatti, M.; Meharrar, A.; Tioursi, M. 2010. Novel Approach of Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Module Neural Network based, *International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications (EFEEA'10)*, 2-4 November 2010, Ghardaia, Algeria. 1–6.

Hla, H. K.; Yit, J. L.; Nant, N. M. H.; Jiang, F. 2014. Characteristics of Different Solar PV Modules under Partial Shading, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering* 8(9): 1340–1344.

Holman, J. P. 1992. Heat transfer: London; Sydney: McGraw-Hill 713p.

Hong, H. L.; Phan, Q. D.; Le Dinh, K.; Le Minh, P.; Nguyen, T. D. V. 2010. The New Maximum Power Point Tracking Algorithm using ANN-Based Solar PV Systems, *Tencon*: 2179–2184.

Huan-Liang, T.; Ci-Siang, T., Yi-Jie, S. 2008 Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, (WCECS 2008) 22-24 Octoberr, San Francisco. 6 p.

Hussein, K. H.; Muta, I.; Hoshino, T.; Osakada, M. 1995. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.* 142(1): 59–64.

Yasushi, K.; Koichiro, Y.; Masahito, K. 2010. High-Speed Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems Using Online Learning Neural Networks, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics* 14(6): 677–678.

Yoash, L.; Doron, S. 2013 Maximum Power Point Tracking Employing Sliding Mode Control, *IEEE transactions on circuits and systems-I: regular papers* 60(3): 724–732.

Young-Hyok, J.; Doo-Yong, J.; Chung-Yuen, W.; Byoung-Kuk, L.; Jin-Wook, K. 2009 Maximum Power Point Tracking Method for PV Array under Partially Shaded Condition, in *Conference Energy Conversion Congress and Exposition, (ECCE 2009) 20–24 September, California*. 307–312.

Joe, A. J.; Tsong, L. Hu.; Ying, T. H.; Chia, H. C. 2005. Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems, *Tamkang Journal of Science and Engineering* 8(2): 147–153.

Jones, A. D.; Underwood, C. P. 2001. A Thermal Model For Photovoltaic Systems, *Solar Energy* 70(4): 349–359.

Kashif, I.; Zainal, S.; Muhammad A.; Saad, M. 2012. An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)–Based MPPT for PV With Reduced Steady-State Oscillation, *IEEE transactions on power electronics* 27(8): 3627–3638.

Larbes, C.; Cheikh, S. M. A.; Obeidi, T.; Zerguerras, A. 2009. Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system, *Renewable Energy*, 34: 2093 – 2100.

Laura, M.; Giorgio, B.; David, M.; Matteo Del B. 2014. BiPV system performance and efficiency drops: overview on PV module temperature conditions of different module types, *International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry September 23-25, 2013, Freiburg, Germany*.

Lewis, M. F. 2014. *Low-Cost Solar Electric Power*. 181 p.

Lijun, G.; Roger, A. D.; Shengyi, L.; Albena, P. I. 2009. Parallel-Connected Solar PV System to Address Partial and Rapidly Fluctuating Shadow Conditions, *IEEE Transactions On Industrial Electronics* 56(5): 1548–1556.

Lokanadham, M.; Vijaya, B. K. 2012. Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* 2(2): 1420–1424.

Lorenzo, E. 1994. *Solar Electricity– Engineering of Photovoltaic Systems*. Selvilla: Progenesa: 315 p.

Shamim, M. K.; Subrata, K. A.; Rezaul, K. M. 2006, Performance Evaluation of a Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Solar Electric Vehicle using Artificial Neural Network, *Daffodil International University Journal Of Science And Technology*, 1(1).

Mačiulis, V.; Galdikas, A. J. 2015. Saulės energetika, *Lietuvos Energetika*. 124–133.

Malik, A.Q.; Mohamad F. bin H. M. 2010. Performance of Single Crystal Silicon Photovoltaic Module in Bruneian Climate, *International Journal of Applied Science and Engineering* 8(2): 179–188.

Meier, D. L.; Davis, H. P.; Garcia, R.A.; Salami, J.; Rohatgi, A.; Ebong, A.; Doshi, P. 2001. Aluminum alloy back p-n junction dendritic web silicon solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 65: 621–627.

Miles, R. W.; Hynes, K. M.; Forbes I. 2005. Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* 51: 1–42.

Mohamed, A. El-S.; Steven, L. 2014. Evaluation of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Electricity Generation in Kuwait, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)* 12: 7 p.

Pan, C. T.; Chen, J. Y.; Chu, C. P.; Huang, Y. S. 1999. A fast maximum power point tracker for photovoltaic power systems, in *Proc. 25th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron.* 390–393.

Peter P. 2014. Environmental and Economic Benefits of Building Solar in California: Quality Careers—Cleaner Lives, *Donald Vial Center On Employment In The Green Economy*. 52 p.

Platakis, A.; Bleizgys, V.; Lučinskis, A.; Baškys, A. 2012. Investigation of photovoltaic inverter power quality, *Przełqd elektrotechniczny* 88(7b): 180–183.

Pradeep, A. K. Y.; Thirumaliah, S.; Haritha, G. 2012. Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 1(1): 18–23.

Quaschnig, V. 2005. *Understanding Renewable Energy Systems*. 290 p.

Radziemska, E. 2003. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells, *Renewable Energy* 28(1): 1–12.

Saga, T. 2010 Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production, *NPG Asia Materials* 2(3): 96–102.

Salas, V.; Olias, E.; Barrado, A.; Lazaro, A. 2006. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90. 1555–1578.

Saravana, D.; Harikrishnan, V.; Umayal, V.; Indumathy, M. 2014. Performance Analysis of Slide Mode Control based MPPT Controller for Photovoltaic Applications, *International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014)* March 29–30, 2014 Singapore. 339–344.

Saurabh, K. R. 2013. Effects of High Module Temperature on Electrical Efficiency of Opaque Type Photovoltaic (PV) Module with Emphasis on Temperature Coefficient of Efficiency (TCE), *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2(10): 4907–4914.

Savita, N.; Nema, R.K.; Gayatri, A. 2010. Matlab / simulink based study of photovoltaic cells / modules / array and their experimental verification, *International Journal Of Energy And Environment* 1(3): 487–500.

Sayed, T.; Tavakoli, A.; Razavi, A. 2003. Comparison of Adaptive Network Based Fuzzy Inference Systems and B-Spline Neuro-fuzzy Mode Choice Models, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE 17(2): 123–130.

Schwingshackla, C.; Petittaa, M.; Wagnera, J.E.; Belluardoc, G.; Moserc, D.; Castellia, M.; Zebischa M.; Tetzlaff A. 2013. Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation, *Energy Procedia*, 40: 77–86.

SenthilMurugan, N.; Sharmeela, C.; Saravanan, K. 2010. Modeling of Photo Voltaic Arrays with Soft Switching Converter Design and Simulation for Maximum Power Point Tracking, *International Journal of Computer Applications* 8(13): 43–49.

Shih-Wei, F.; Chih-Ming, L.; Chin-Yi, T.; Yu-Ru, S.; Li-Wei, T. 2013. Modeling of InGaP p-n junction solar cells, *Optical Society of America* 3(10): 12 p.

Skoplaki, E.; Palyvos, J. A. 2009. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy* 83: 614–624.

Sridhar, R.; Jeevananathan, Dr.; Thamizh, S. N.; Saikat, B. 2010. Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm, *International Journal of Computer Applications* 7(5): 35–39.

Srushti, R. C.; Uttam B. V. 2013. Incremental Conductance MPPT Technique For PV System, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 2(6): 2719–2726.

Surya, K. J.; Sai Babu, Ch.; Kamalakar, Babu A. 2012. Design and A Nalysis of P&O and IP&O MPPT Techniques for Photovoltaic System, *International Journal of Modern Engineering Research* 2(4): 2174–2180.

Swapnil, D.; Jatin, N. S.; Bharath, S. 2013. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World A Review, *Energy Procedia* 33: 311–321.

Trishan, E.; Patrick, L. C. 2007. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, *IEEE Transactions On Energy Conversion* 22(2): 439–449.

Thijs, D.; Bert, B.; Jan C. 2010. Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling, *Energy Conversion and Management*: 20p.

Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija 2015. *Tarifai elektros energijos gamintojams, naudojančiams atsinaujinančius energijos išteklius*. [žiūrėta 2015-05-09] Prieiga per internetą: <http://www.regula.lt/atsinaujinantys-istekliai/Puslapiai/tarifai.aspx>

Vasarevičius, D.; Martavičius, R. 2011. Solar Irradiance Model for Solar Electric Panels and Solar Thermal Collectors in Lithuania, *Electronics and Electrical Engineering* 2(108): 3–6.

Verikas, A.; Bacauskienė, M. 2003. Using artificial neural networks for process and system modelling. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 67(2): 187–191.

Vikrant, A. C. 2005 Automatic Peak Power Tracker For Solar PV Modules Using dSPACE Software, *Thesis Submitted in partial fulfillment of the Requirement for the award of the Degree Of Master Of Technology*. 98 p.

Williams, K. F.; Shanifa, B. S.; Johnson, M. 2014. MATLAB/Simulink PV Module Model of P&O And DC Link CDC MPPT Algorithms with Labview Real Time Monitoring And Control Over P&O Technique, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 3(5): 92–101.

World Nuclear Association 2015. *World Energy Needs and Nuclear Power*. [žiūrėta 2015-05-09] Prieiga per internetą: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/World-Energy-Needs-and-Nuclear-Power/>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Pikutis. M.; Vasarevičius D.; Martavičius R. 2015. The influence of temperature of photovoltaic modules on performance of solar power plant, *IOSR Journal of Engineering*, 5(4): 9–15 p. ISSN (e): 2250-3021, ISSN (p): 2278-8719 (IndexCopernicus).

Pikutis. M. 2015. Temperatūros įtaka saulės jėgainei, *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 7(2): 5 p. ISSN 2029-2341 (IndexCopernicus).

Pikutis. M. 2014. Dirbtinių neuronų tinklo taikymas didžiausios galios taško saulės elementuose sekimo algoritme, *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 6(2): 182-187 p. ISSN 2029-2341 (print) / ISSN 2029-2252 (IndexCopernicus).

Pikutis, M.; Vasarevičius D.; Martavičius R. 2014. Maximum power point tracking in solar power plants under partially shaded condition, *Electronics and Electrical Engineering*, 20(4): 49–52 p. ISSN 1392–1215 (ISI Web of Sciences).

Vasarevičius D.; Pikutis M. 2012. Matematinis saulės energijos srauto modelis didžiausios galios taško saulės elementuose sekimo algoritmams tirti, *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 4(1): 51–55 ISSN 2029-2341 (print) / ISSN 202–2252 (IndexCopernicus).

Vasarevičius D.; Martavičius R.; Pikutis M. 2012. Application of artificial neural networks for MPPT algorithms, *Electronics and Electrical Engineering*, 18(10): 65–68 ISSN 1392–1215 (ISI Web of Sciences).

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Demand for electricity is growing every year in a worldwide (World Nuclear Association 2015). There are increasingly using renewable energy sources, so that it would reduce environmental emissions of fossil fuels. There are constructing a lot of wind, water, solar and other renewable energy sources power plants in order to reach the demand of electricity. Solar power plants are supported in many countries, by its actual grant. Electricity from solar power plants are purchasing at a higher rate than the established market price in Lithuania (National Commission for Energy Control and Prices 2015). According to the experience of other European countries, which has a long time funding support of solar power plants constructing, the prices of buying and selling of electricity gradually gets equal.

It is very important that solar power plant would be working at maximum power point under different environmental conditions. In that case, it would be able to use a maximum amount of solar energy flux and to generate electrical energy as much as possible during the entire lifetime in a solar power plant.

It is necessary to install a maximum power point tracking controller in a solar power plant, so that it could work properly. Unfortunately, not all solar energy is converted

to electrical energy, because mostly of the controllers are slow or inaccurate. In that case, solar power plant is working inefficiently, because of the controller imperfection.

Evaluation of effective controlling system of a solar power plant is discussed in dissertation.

Relevance of the thesis

The solar power plant operating mode must be at maximum power point, in order to utilize the solar energy as much as possible. Efficiency of operating solar power plant depends on the controller. The main task of the controller is to find maximum power point in the solar power plant as fast as possible under all environmental conditions. One of the main issue, which might take a negative effect of the effective controller operating are unpredictable shadows on the power plant surface. It might become when there is windy day. It is very difficult to keep operating mode in maximum power point, when there is a shadow just only on the part of the solar power plant. In this case, a few maximum power points can be found in solar power plant: local maximum power point and global maximum power point. Solar power plant generates much less power, when the controller is not able to detect a global maximum power point of the solar power plant operating mode, but remains in a local maximum power point. In this case, not all solar energy is used inefficiently.

The other issue, which has a negative effect of the effective controller operating is temperature changing of the photovoltaic module. As much as the sun energy reach the surface of the solar power plant, the photovoltaic module temperature get higher as well. When the temperature is higher, the efficiency of the operating characteristic of the photovoltaic modules is lower. In order to generate more power in solar power plant, it is necessary to regulate the temperature of the photovoltaic modules.

Mostly of the controllers which is tracking maximum power point is operating in open circuit voltage and short circuit current operating mode. There is a high probability to make a damage of photovoltaic cells inside the photovoltaic module, when the maximum power point is tracking in such mode. For this reason, part of the photovoltaic module or sometimes whole photovoltaic module can operate ineffectively. This is why it is necessary to improve the methods of the maximum power point tracking systems.

The relevance is in the proposed intelligent maximum power point tracking method which is based on artificial neural networks. Using artificial neural networks in maximum power point tracking systems, it helps to find maximum power point much faster and much accurately, which helps to increase the efficiency of solar power plant.

Analysis and verifying of the relevant hypotheses:

- applying of intelligent methods in maximum power point tracking system allows fast and accurate to detect the maximum power point in solar power plants;
- in practice implemented an intelligent maximum power point tracking method allows to increase the efficiency of solar power plants without changing photovoltaic modules or increasing the amount of it in solar power plant.

The object of the research

Object of research – methods of load resistance changing and adaptation of algorithms of maximum power point tracking under different environmental conditions of solar power plants.

The aim of the thesis

The aim of the thesis is to create and investigate the method of maximum power point tracking which allows to increase the efficiency of a solar power plant under fast changing environmental conditions and improve the method of load resistance changing.

Objectives of the thesis

To achieve the goal of the thesis, following tasks have to be solved:

1. To create and investigate models of a solar power plant efficiency with maximum power point tracking system.
2. To propose methodology which allows to increase the efficiency of maximum power point tracking algorithm of solar power plant.
3. To investigate the influence of changing environmental conditions of solar power plant efficiency.
4. To propose effective methodology of load resistance changing of solar power plant.

Research methodology

Throughout this work methods of modeling of controlling systems and analysis of statistics is used. Hypotheses are checking through the mathematical models, simulation and experimental research.

Scientific novelty of the thesis

Dissertation provides following novelty in the field of electrical and electronics engineering:

1. Simulations demonstrated that the solar power plant efficiency is strongly influenced by the changing of solar power flux, therefore was created quick

and precise load resistance adjustment method to increase the efficiency of solar power plant.

2. In order to increase the efficiency of solar power plant at rapidly changing environmental conditions, there were implemented artificial neural networks in maximum power point tracking system.
3. There was proposed an effective load resistance changing method to improve the efficiency of solar power plant.

Practical value of the research findings

Practical significance of achieved results were found:

1. Mathematical models is suitable to use for solar power plants in operating systems and checking the efficiency of solar power plant.
2. The studies led to recommendations to solve problems and implement improvements for maximum power point tracking in solar power plants.
3. The studies consist of created solar power plant control method for practical use of adapting the real operating conditions.
4. The results are used in a project, which is part-funded by EU – SMART–FLEX: Demonstration at industrial scale of the FLeXible manufacturing of SMART multifunctional photovoltaic building elements.

The defended statements

1. Created solar power plant model allows to simulate operating conditions of solar power plant when maximum deviation is 1.9 % and it is suitable for operating and prediction of solar power plants efficiency.
2. The application of intelligent maximum power point tracking systems based on artificial neural networks and operates within the developed algorithms in solar power plant allows to increase an electricity generation of 17% in Lithuania terms.
3. Forced cooling of photovoltaic modules in solar power plant in real operating conditions allows to increase electricity generation of 31% in Lithuanian terms.

Approval of the research findings

Six articles are published on the subject of dissertation: two – in scientific journals included in *Thomson Reuters Web of Knowledge* list *Web of Science* (Vasarevičius, Martavičius, Pikutis 2012, Pikutis, Vasarevičius, Martavičius. 2014), four – in scientific journal listed in other international databases (Vasarevičius, Pikutis 2012, Pikutis 2014, Pikutis 2015, Pikutis, Vasarevičius, Martavičius 2015).

Dissertation research results have been announced in nine scientific conferences in Lithuania and abroad.:

- Pikutis, M. 2011. Saulės elementų maksimalios galios taško sekimas taikant dirbtinius neuronų tinklus. The 14th Conference for Lithuanian Young Researchers „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 18th March 2011.
- Pikutis, M. 2012. IncCond didžiausios galios taško sekimo algoritmo tyrimo rezultatai. The 15th Conference for Lithuanian Young Researchers „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 16th March 2012.
- Vasarevičius D., Martavičius R., Pikutis M. 2012. Application Of Artificial Neural Networks For Maximum Power Point Tracking In Photovoltaic Panels. The 16th International Conference „*Elektronika 2012*“. Palanga, 18–20th June 2012.
- Pikutis, M. 2013. Didžiausios galios taško sekimas daugiמודulinėse saulės jėgainėse. The 16th Conference for Lithuanian Young Researchers „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 16th March 2013.
- Pikutis M., Vasarevičius D., Martavičius R. 2013. Maximum power point tracking in solar power plants under partially shaded condition. The 17th International Conference „*Elektronika 2013*“. Palanga, 2013 m. 17–19th June 2013.
- Pikutis, M. 2014. Aplinkos temperatūros poveikis modulio darbinėms charakteristikoms ir jėgainės našumui. The 17th Conference for Lithuanian Young Researchers „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 21th March 2014.
- Pikutis, M. 2014. SmartFlex conference „*Second Workshop on Building–Integrated Photovoltaics*“ Le Bourget du Lac, France 15-16th September 2014.
- Pikutis, M. 2015. Temperatūros įtaka fotovoltinei jėgainei debesuotą dieną. The 18th Conference for Lithuanian Young Researchers „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 20th March 2015.
- Pikutis, M. 2015. Fotovoltinės elektrinės modelio kūrimas ir jos elektroninio valdiklio algoritmų tyrimas ir tobulinimas. FTMC PFI Materials Science and Electrical Engineering Research Seminar. Vilnius, Lithuania 17th Jun 2015.

The structure of dissertation

Dissertation consists of introduction, three chapters, general conclusions, lists of references and author's publications on the subject of dissertation and summary in English.

The total scope of dissertation – 101 pages, 31 indexed equations, 39 pictures, 6 tables, 78 references have been used.

1. Analysis of control methods of solar power plants and their mathematical models

Solar power plants were produced 45 GWh of electrical energy in Lithuania during the year 2013 (Mačiulis, Galdikas 2015). In table A.1 can be seen the quantity and power of the operating solar power plants in 2014. (Mačiulis, Galdikas 2015).

Table S.1. Characteristics of solar power plants in Lithuania in 2014 September

| Capacity of solar power plant, kW | Quantity, pcs. | Electrical power, MW |
|-----------------------------------|----------------|----------------------|
| 0–10 | 170 | 1.3 |
| 11–27 | 158 | 2.9 |
| 28–32 | 1600 | 47.6 |
| 33–100 | 42 | 4.1 |
| 101–999 | 10 | 5.9 |
| 1000–3000 | 4 | 8.0 |
| TOTAL | 1984 | 69.8 |

Despite the numbers in table S.1 are not large, you can enjoy knowing that a total power of solar power plants has been achieved in only a few years, which was handy legislative instruments to invest in the construction of solar power plants.

Photovoltaic energy development is subsidized of the state by increasing production of electric energy purchase price. Unfortunately purchase price is reducing over the time. In order to maintain the profitability of photovoltaic energy, photovoltaic power developers are looking for a ways to increase the efficiency of solar power plants. One of the ways to increase the efficiency of solar power plant is to convert as much as possible solar power flux into an electrical power. How many solar power flux will be converted into electrical energy highly dependent on the type of photovoltaic cell. The most expensive, but the best performance having to convert solar energy into electricity is monocrystalline and bifacial photovoltaic cells. The efficiency of the most polycrystalline photovoltaic cells is less than 22 %.

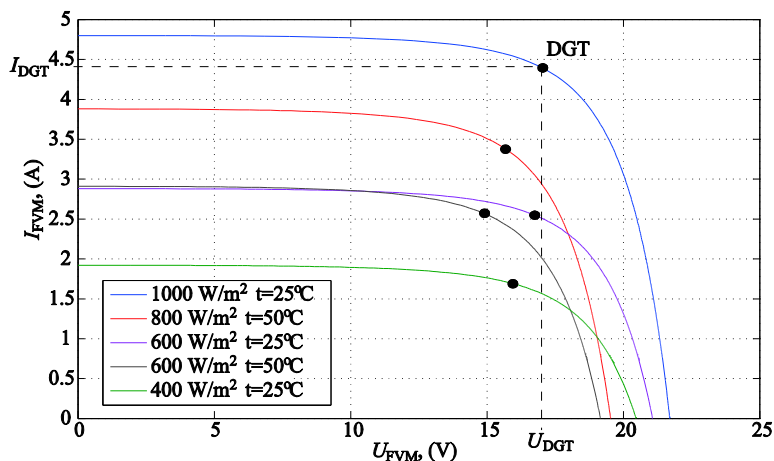


Fig. S.2. MPP depending on a different solar radiation and temperature

Figure S.2 shows the current–voltage characteristic of photovoltaic module when different solar power flux is falling to the surface of photovoltaic module and module temperature grows from 25 °C to 50 °C. Whose characteristic presents the effect of solar power flux and the temperature of operating photovoltaic module. The point marked in current–voltage characteristic shows the maximum power point (MPP) of operating photovoltaic module at optimal load resistance. The first, second and third curves reveals maximum power point, when there are different solar power flux and the same temperature. The fourth curve reveals of the maximum power point, when solar power flux is 600 W/m² and the temperature is changed. The fifth curve reveals the impact of two factors of photovoltaic module – the increase of solar power flux and its temperature rises.

Comparing first, second and third series reveals, that at constant temperature, the decrement of solar power flux causes significant decrement of photovoltaic modules output current. When solar power flux is at constant level of 600 W/m² and temperature rises from 25 °C to 50 °C, the output current of photovoltaic module remains almost unchanged, but the voltage decreases by 2.3 V, so the power decreases by 9 W (series 2 and 4). Therefore, power of the photovoltaic modules is higher when the temperature is lower. It can be stated that the characteristics of operation of PV module depend not only on solar power flux, but also on module temperature and it is necessary to keep it as low as possible.

There are using maximum power point tracking controllers to keep the photovoltaic module operation in higher effectively. The meaning of maximum power point – the maximum voltage and current intersection point of the module operating characteristic and guarantees the highest received power. Power characteristic of photovoltaic module has sharp point of its maximum. For this reason, even a small deviations from a maximum power point reduces the power of photovoltaic module. To produce as much power as possible, it is necessary to keep operating of photovoltaic module at maximum power point all the time.

Maximum power point tracking in solar power plant is complicated because of unpredictably varying environmental conditions and different characteristics of different PV cells or modules (Anmol and Shyam 2014). These differences can appear on some of the PV models of a single power plant if it affected by partial shadow, snow cover, hoarfrost, dust or tree leaves stuck on the surface of some PV modules. These effects are of random nature and it is impossible to predict their influence for different PV modules. Because of these effects it is not possible to predict the correct load of solar power plant at certain time intervals (Hla *et al.* 2014).

It is very important to keep the correct loading of photovoltaic modules, because only in this case the solar power plant will operate at maximum power point and will utilize the available solar power flux with highest efficiency.

Different methods are used for maximum power point tracking. Currently, Incremental Conduction, Perturb and Observe and Ripple Correlation Control are the most frequently discussed and analyzed maximum power point algorithms in literature. All these maximum power point tracking algorithms are rather slow to respond to the fast-changing weather conditions. Furthermore, most of them can not accurately detect the maximum power point. For these reasons whole solar power plant is operating inefficiently.

There is a probability, that not all solar modules will receive the same amount of solar radiation in a solar power plant with series or array topology, due to availability of shadows. There is a risk of overheating and permanent damage when a single photovoltaic cell within a module is affected by the shadow. Bypass diodes are used in solar modules to protect the cells from overheating.

Overheating is not the only problem caused by partial shadows. Due to shadows not all modules in the solar power plant are affected by direct solar radiation. In such conditions local maximum points can appear in power – voltage characteristics of solar power plant due to bypass diodes. Algorithms which were investigated are very slowly in jump from local maximum power point to global maximum power point. This causes significant energy losses at the output of solar power plant.

Recently, artificial neural networks are increasingly used for solar energy extraction. There are the main areas where artificial neural networks is used in experiments:

- short-term prediction of received solar energy (up to 24 hours);
- long-term prediction of received solar energy (more than 1 month);
- additional tool for maximum power point tracking algorithms in a controller of solar power plant.

Prediction of the electrical energy, from solar power plants using artificial neural network, begins to function effectively only after a very long training time, which can be longer than 4 years.

When the artificial neural network is using for maximum power point tracking, the data for artificial neural network training is used from the dependence on maximum power and solar power flux. When the artificial neural network is trained an approximate position can provide of the maximum power point (Hatti, *et al.* 2010). There are literature sources (Chaouachi, *et al.*, 2009), which describes the attempts to apply the artificial neural network for short-term prediction of solar power flux, to detect the maximum power point of solar power plant. However, this method is similar to the first two meth-

ods for the energy prediction and requires a very long time for training, so they are unsuitable for the thesis formulated in tasks.

Studies and research of solar power plants in real world conditions require significant investment in equipment and takes a lot of time. This can be avoided by investigating the developed mathematical model of solar power plant and simulating real world conditions. This allows to compare the operation of solar power plant at certain time intervals, when only preferred parameters are changed.

2. Implementation of solar power plant in mathematical models

First of all, separated photovoltaic cell is implemented in mathematical model, when operating characteristic is close to actual performances of photovoltaic cell. In the literature can be found a various ways how to implement a mathematical model of photovoltaic cells (Adel 2010; SenthilMurugan, Sharmeela 2010). After analyzing of the literature, it can be said that such a model is characterized by the voltage and current dependence in most cases. Figure B.1 shows a typical electrical diagram of photovoltaic cell. An ideal photovoltaic elements should have an ideal current source, as well as the diode in parallel must has an ideal electrical properties. Diode I_d in parallel of the current source generates a reverse saturation current. It is known that there is no ideal electrical elements in practice, so resistance R_s and R_{sh} is connected in circuit (Sridhar, Jeevanathan 2010).

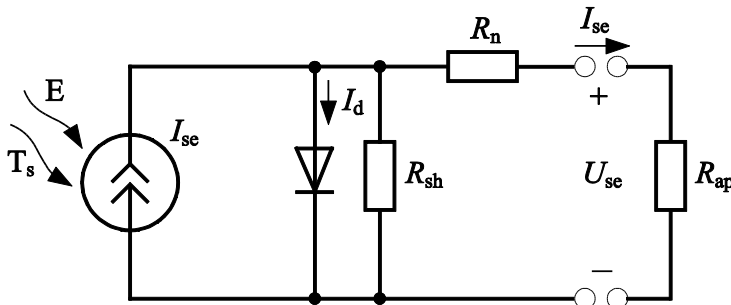


Fig. S.3. Equivalent diagram of photovoltaic cell

Implemented mathematical model is based on photovoltaic module data in Table S.2.

In mathematical model was simulated a variation of load resistance to generate current and voltage characteristics of photovoltaic module (Fig. S.4 a). Initial of verification shows that current–voltage characteristic match the parameters in table S.1. It is obvious a uniformity of short circuit current and open circuit voltage values. It is necessary to calculate the maximum power of the photovoltaic module to verify the accuracy. For this

purpose, the power of photovoltaic module is calculated by multiplying the output of the instantaneous current and voltage values. Maximum power characteristic is shown in Fig. S.4 b.

Table S.2. Electrical data of photovoltaic module

| Parameter | Value |
|--|-------|
| Peak power P_P , W | 75 |
| Current at maximum power point I_{DGT} , A | 4.4 |
| Voltage at maximum power point U_{DGT} , V | 17.0 |
| Short circuit current I_{tr} , A | 4.8 |
| Open circuit voltage U_{aj} , V | 21.7 |
| Temperature coefficient of short circuit current α_{tr} , mA/°C | 2.06 |
| Temperature coefficient of open circuit voltage β_{aj} , mV/°C | -77 |

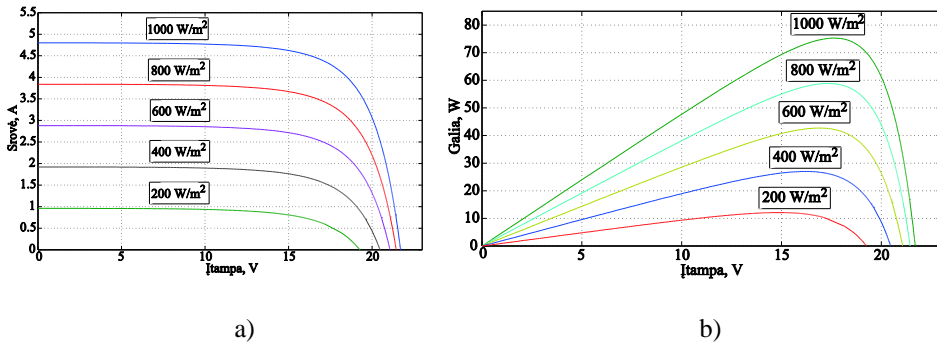


Fig. S.4. Current–voltage a) and power–voltage b) curves of photovoltaic module when the temperature is 25 °C

It can be said, that implemented mathematical model corresponds to a real photovoltaic module operating properties. Implemented photovoltaic module allows to change performance of photovoltaic modules and to adjust it to a real photovoltaic module parameters.

There is implemented temperature variation model, which is required to simulate natural variations of temperature changes. Ambient temperature is different than the temperature of operating photovoltaic module (Armstrong et al. 2010), so implemented mathematical model simulates the temperature changes of photovoltaic module at changing environmental conditions. It is known that the temperature of photovoltaic module can be reach 70 °C (Malik et al. 2010), in some regions of the world even more (Saurabh 2013). To investigate the influence of the temperature to the solar power plant control algorithm, it is necessary to understand how the temperature is changing at photovoltaic module.

Temperature of photovoltaic module can be influenced by many factors, such as: intensity of solar power flux, ambient temperature, wind speed and direction (Schwingshackla, et al. 2013), materials features of photovoltaic module (Hunter, et al. 2006) and of course mounting method of the photovoltaic module (Laura et. al. 2014). Temperature of photovoltaic module does not change as fast as the solar power flux is changing. It means that temperature of photovoltaic module begins to rise just over the time, when the solar power flux is increasing. It is the same, when the solar power flux is reducing – temperature of photovoltaic module starts to cool down just over the time.

The main three factors have an influence of heat Exchange, such as: conduction, convection and solar radiation. The main heat transfer during operation of photovoltaic module is shown in Fig. S.4. Convection exchanges and solar radiation are strongly related between front and rear sides of the photovoltaic module, while the convection exchanges between frame of photovoltaic module and the building or other structure is negligible. Changes of temperatures in photovoltaic module over time can be expressed through the following expression:

$$C_{\text{mod}} = \frac{dT}{dt} = q_{ib} + q_{tb} + q_{konv} - P_{is}, \quad (2.13)$$

where C_{mod} – temperature of photovoltaic module; q_{ib} – long wave energy exchange at photovoltaic module surface; q_{tb} – short wave energy exchange at photovoltaic module surface; q_{konv} – thermal convection exchange in photovoltaic module; P_{is} – electrical power generated by photovoltaic module.

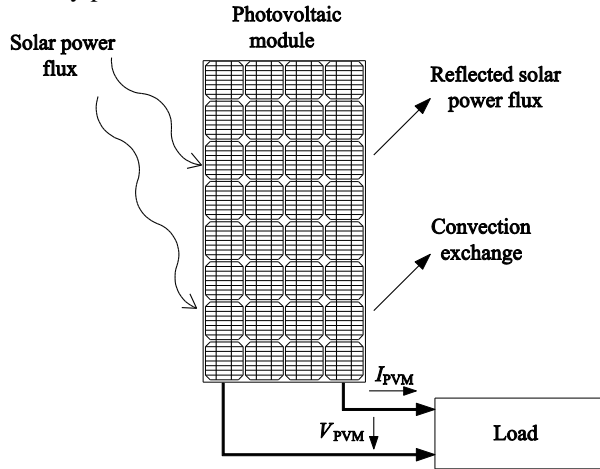


Fig. S.5. Structural diagram of heat exchanging in photovoltaic module

Implemented *Incremental Conductance* maximum power point tracking algorithm of solar power plant. Maximum power point tracking algorithm is implemented in a separate program block. In this block can be easily change any of the parameters in order to investigate one of the most frequently applied in practice algorithm in more detail to find the advantages and disadvantages.

Implemented maximum power point tracking algorithm in solar power plant controller is shown in Fig S.6.

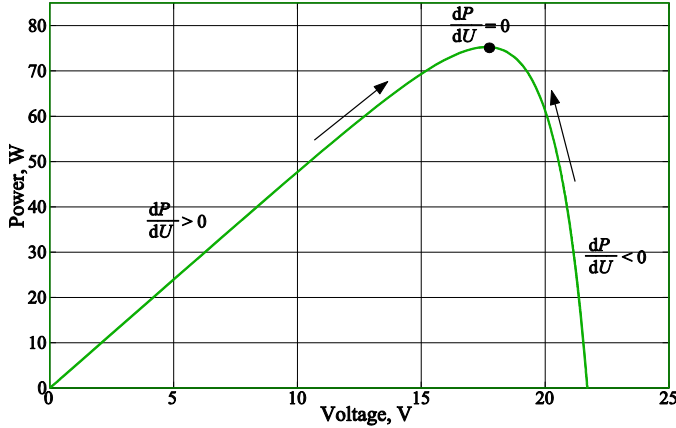


Fig. S.6. Maximum power point tracking using *Incremental Conductance* algorithm

Maximum power is reached in solar power plant when the dP/dU approaches to zero (Amarnath, Suresh 2013). Calculations of the algorithm are based on the increasing voltage and power output of photovoltaic module. If the result of dP/dU is not equal to zero, the controller changes the voltage until it closes to zero. Maximum power can be reached in solar power plant using this way. According to the described algorithm it decides if voltage needs to be increased or decreased. Following conditions are defined in order to assess where the maximum power point is in solar power plant operation mode:

- voltage must be increased, when $\frac{dP}{dU} > 0$;
- voltage must be reduced, when $\frac{dP}{dU} < 0$;
- solar power plant is operating at maximum power point, when $\frac{dP}{dU} = 0$.

Artificial neural network is used as an additional tool for maximum power point tracking in solar power plant controller. Structural diagram of implemented solar power plant is shown in Fig. S.7. In this model, the power plant can consist of the required number of PV modules. Signal S_T , which is imitating solar power flux is sent to each PV module. It is generated by solar power flux block. The parameters of this block are selected in such a way, that it imitates solar power flux signal, close to the real one on a partially cloudy day. To simulate the effects of temperature to the performance of the solar power plant, the temperature simulation block is used. In the model it is assumed, that all the modules are of the same type, and they are affected with the same solar radiation, so the same temperature signal is used for all the modules. Thus, these blocks simulate solar power flux and instantaneous temperature of the modules. For the maximum

power point tracking it is using incremental conductance and artificial neural network algorithm. This algorithm lets to increase the efficiency of solar power plant operating under rapidly changing environmental conditions.

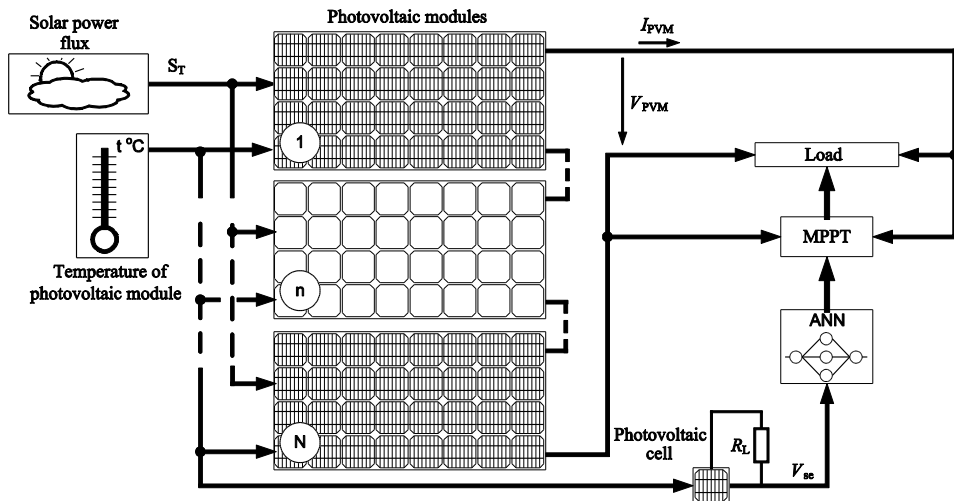


Fig. S.7. Structural diagram of the solar power plant with artificial neural network operation

Separated blocks of solar power plant consists of complete mathematical model which allows to investigate a different capacity of solar power plants. Implemented mathematical model allows to simulate various operating conditions of solar power plant, when there is simulating a different solar power flux, module temperature or there is using a different maximum power point tracking algorithms.

3. Investigation of solar power plant operation under unpredictable environment conditions

Compare simulation obtained from the photovoltaic module performance with the same power photovoltaic module characteristics measured during the experiment, it can be said that a mathematical model simulates a similar characteristics as a real photovoltaic modules on the market and can be used in solar power plant research.

To investigate the influence of shadows to operation of solar power plant the model is developed with three solar modules connected in series and having a peak power of 90 W. During the investigation different step load resistance values ΔR were tested to find optimal value, at which algorithm can reliably detect maximum power point and keep fast operation. Load resistance value is $\Delta R = 0.7\ \Omega$. Characteristics of the solar power plant, operating during a daytime on August 14, is showed in Fig. S.8. All three solar modules are operating at the same environmental conditions. The signal imitating 15 hours of rapidly changing solar power flux was simulated (Fig. S.8 (a)). In Fig. S.8 (b)

curve 1 shows the variation of load resistance due to operation of maximum power point tracking algorithm and curve 2 shows the power at the output of solar power plant.

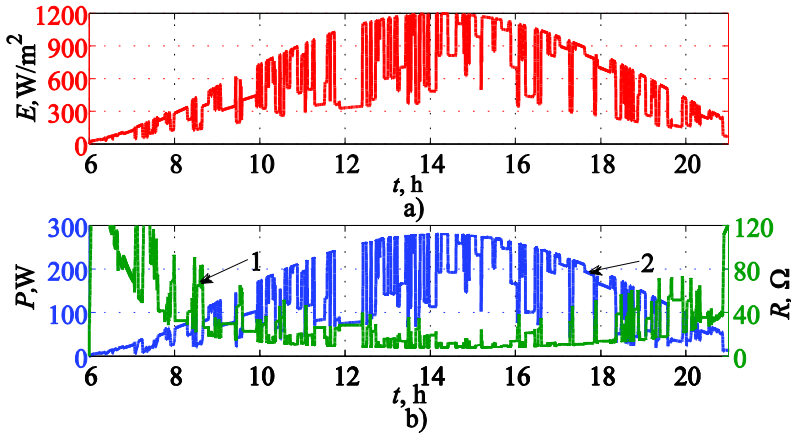


Fig. S.8. Simulated signal of solar power flux (a) and load resistance, set by Incremental Conductance algorithm and the power at the output of solar power plant (b).

Using of bypass diodes in photovoltaic modules increase the efficiency of almost 2 times. When there is partially shaded conditions a local maximum points can appear in power – voltage characteristics of solar power plant due to bypass diodes. When wrong (local) maximum power point is detected by maximum power point algorithm, an opportunity to utilize all available solar power flux is lost. Power differences between local and global maximum power points can be up to 55 %.

Overheating is not the only problem caused by partial shadows. Due to shadows not all modules in the solar power plant are affected by direct solar radiation. In such conditions local maximum points can appear in power – voltage characteristics of solar power plant due to bypass diodes. Algorithms which were investigated are very slowly in jump from local maximum power point to global maximum power point. This causes significant energy losses at the output of solar power plant.

Applying a forced cooling to photovoltaic modules and keeping their temperature not higher than 18 °C, during a day with small wind speed, the electrical energy output of solar power plant increases by 31 %, compared to the case, when cooling is not used. Applying a forced cooling to PV modules and keeping their temperature not higher than 18 °C, during a day with strong, gusty wind, the electrical energy output of solar power plant increases by 11 %, compared to the case, when cooling is not used.

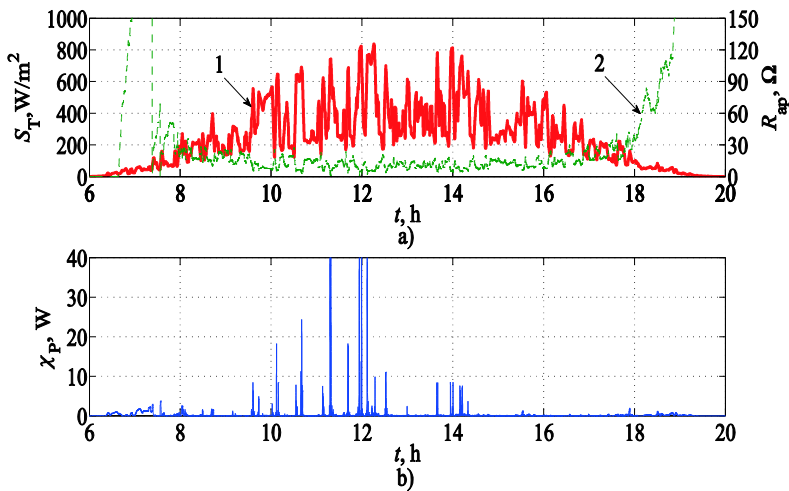


Fig. S.9. Characteristics of maximum power point tracking, when there is using artificial neural network and *Incremental Conductance* algorithm during the cloudy day and clouds are moving fast: 1 – solar radiation S_T curve during daylight time; 2 – load resistance R_{ap} curve of using artificial neural network and *Incremental Conductance* algorithm; 3 – χ_p difference between actual power and maximum power with ideal load resistance.

Characteristics of maximum power point tracking, when there is using artificial neural network and *Incremental Conductance* algorithm during the cloudy day and clouds are moving fast is shown in Fig. S.9. As shown in Fig S.9, training of the artificial neural network was finished about 14:00 o'clock. For maximum power point tracking were using combination of artificial neural network and *IncCond* algorithm during the period up to 14:00 o'clock. During this period artificial neural network was learning and the power losses was just only a few times over 20 W.

The application of intelligent maximum power point tracking systems based on artificial neural networks and operates within the developed algorithms in solar power plant allows to increase an electricity generation of 17 % in Lithuania terms.

General conclusions

1. Photovoltaic energy development is subsidized of the state by increasing production of electric energy purchase price. Unfortunately purchase price is reducing over the time. In order to maintain the profitability of photovoltaic energy, photovoltaic power developers are looking for a ways to increase the efficiency of solar power plants. One of the ways to increase the efficiency of solar power plant is to convert as much as possible solar power flux into an electrical power.

2. In order to investigate and analyze the efficiency of solar power plants, it is necessary to have a photovoltaic power plant simulation model which is able to use for

different structure of solar power plant and it is able to simulate various environmental conditions in selected area of the world.

3. Implemented simulation model of photovoltaic module, with a possibility to modified an operation characteristics and adapted it to an existing photovoltaic module type. According to the model, solar power plants can be investigated in detail almost without any mistakes.

4. Temperature of operating photovoltaic module can be reach 70°C and sometimes even more. Implemented mathematical model of temperature variation allows to simulate temperature changing in photovoltaic module. Temperature variation calculation in mathematical model is based on solar power flux intensity, ambient temperature and wind speed.

5. The most frequently applied in practice maximum power point tracking algorithm is implemented in a separate program block, which allows to modify easily any parameter of the solar power plant control, in order to investigate the advantages and disadvantages of this algorithm.

6. Shadows arise because of clouds or other factors on the separated photovoltaic modules in solar power plant reduces the efficiency of whole solar power plant. In order to improve the efficiency it is necessary to use bypass diodes in photovoltaic modules. Because of bypass diodes, more than one local maximum power points could arise in photovoltaic modules power characteristic, which reduce the efficiency of whole solar power plant. Implemented artificial neural network model in a separate maximum power point tracking algorithm block, allows the solar power plant to avoid working in local maximum power point mode and to track quickly and accurately the maximum power point of the solar power plant to increase the efficiency.

7. Implemented solar power plant mathematical model allows to explore a various capacities of solar power plants. Implemented solar power plant lets to simulate a various operating conditions, when there is changing solar power flux, module temperature or using different maximum power point tracking algorithms. Experimental studies have shown that implemented solar power plant model is suitable for research of solar power plants, their operating performance prediction and control. Maximum deviation does not exceed 1.7 % in the implemented mathematical model.

8. Simulations demonstrate that solar power plant capacity is strongly influenced of changing solar power flux, so there is implemented a quick and precise load adjustment method which is based on artificial neural network, in order to reach the biggest efficiency of operating solar power plant.

9. The application of intelligent maximum power point tracking systems based on artificial neural networks and operates within the developed algorithms in solar power plant allows to increase an electricity generation of 17 % in Lithuania terms.

10. Applying a forced cooling to photovoltaic modules and keeping their temperature constant, the electrical energy output of solar power plant can be increased by 31 %, compared to the case, when cooling is not used.

Priedai¹

A priedas. Matematinių modelių patikrai naudota įranga

B priedas. Fotovoltinės jėgainės 15 valandų trukmės veikimo duomenų masyvai

C priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

D priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Modestas PIKUTIS

FOTOVOLTINĖS ELEKTRINĖS INTELEKTUALAUS VALDYMO KŪRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT CONTROL OF A SOLAR POWER PLANT

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2015 12 28. 10,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius